

Міністерство освіти і науки України
Одеський національний технологічний університет
Кафедра Автоматизації технологічних електромеханічних і робототехнічних
систем



КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему: «Підвищення ефективності автоматичного керування процесом витоку зерна з підвагового бункера до лінії завантаження суден»

Здобувач: Михайлов В.О.
2 курс, група Ам-20

Керівник: доцент Світий І.М.

Консультанти:
доцент Гурський О.О.
доцент Жигайло О.М.

Кваліфікаційна робота допускається до захисту.

Рішення кафедри від _____.2026 р., протокол № ____.

Завідувач кафедри АТЕіРС _____ О.М. Жигайло
(підпис)

Одеса – 2026 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут	<u>Навчально-науковий інститут комп'ютерної інженерії, автоматизації, робототехніки та програмування</u>
Кафедра	<u>ім. П.М. Платонова</u> <u>Автоматизації технологічних процесів і</u> <u>робототехнічних систем</u>
Ступінь вищої освіти	<u>Магістр</u>
Спеціальність	<u>174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка</u>
Освітньо-наукова програма	<u>Комп'ютерні системи та програмна інженерія в автоматизації та робототехніці</u>

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри АТПіРС
І.М. Світій
«05» січня 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Здобувач Михайлов Володимир Олегович

1. Тема роботи «Підвищення ефективності автоматичного керування процесом витоку зерна з підвагового бункера до лінії завантаження суден»

2. Керівник кваліфікаційної роботи Світій Іван Миколайович, к.т.н., доцент.

Пункти 1 і 2 затверджені наказом ОНТУ № 39-03 від 24.01.2025 р.

3. Строк подання здобувачем кваліфікаційної роботи на кафедру «12» червня 2026 р.

4. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: матеріали виконаних індивідуальних завдань (ІЗ) виробничої практики, кваліфікаційної роботи бакалавра, дослідницької практики, курсових та самостійних робіт, виконаних відповідно до ІЗ.

5. Зміст кваліфікаційної роботи (розділи, які потрібно розробити):

Вступ (актуальність роботи, зв'язок з науковими напрямками робіт університету, мета та задачі дослідження, об'єкт та предмет дослідження, методи дослідження, наукова новизна отриманих результатів, практичне значення отриманих результатів, апробація результатів роботи, публікації, структура та об'єм роботи).

Розділ 1. Технологічний процес керування процесом витоку зерна, та задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування (опис ТП і ТА, що його реалізує, як ОК; режими і регламенти ведення ТП і роботи ТА, наслідки їх порушень; існуючі САР і їх недоліки; висновки за розділом – обґрунтування напрямків удосконалення САР).

Розділ 2. Удосконалення САР на основі цілеспрямованого удосконалення її структури (застосування принципів інваріантності, автономності, каскадності, прогнозування, актуальні для конкретної САР, моделювання САР і підтвердження ефективності їх застосування, висновки за розділом)

Розділ 3. Удосконалення САР на основі застосування штучних нейронних мереж (обґрунтування доцільності САР і ШНМ, розробка структури її нейрорегуляторів (НР); навчання ШНМ НР; моделювання САР з НР і підтвердження ефективності її застосування, висновки за розділом)

Розділ 4. Удосконалення САР на основі розширення складу функцій управління (актуальність включення до САР нових функцій: оптимізації, гарантування, активного або пасивного самоналаштування, розробка и моделювання САК, підтвердження ефективності її застосування, висновки за розділом).

Розділ 5. Реалізація алгоритмів керування розробленої САК на контролері, їх тестування та підготовка до впровадження (на підприємстві, де проходила практика, вказати)

Додатки (допоміжні матеріали, ксерокопії програм конференцій, статей, патентів).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Назва розділу	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Удосконалення САР на основі цілеспрямованого удосконалення її структури	Жигайло О.М. к.т.н. доцент каф. АТПіРС		
Удосконалення САР на основі застосування штучних нейронних мереж	Гурський О.О. к.т.н. доцент каф. АТПіРС		
Удосконалення САР на основі розширення складу функцій управління	Степанов М.Т. к.т.н. доцент каф. АТПіРС		

7. Дата видачі завдання «09» січня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу	Строк виконання етапів роботи	Примітка
Вступ та загальна характеристика роботи	«24» березня 2026 р.	
Технологічний процес та задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування	«27» березня 2026 р.	
Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП	«06» квітня 2026 р.	
Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП, на основі застосування штучних нейронних мереж	«17» квітня 2026 р.	
Розробка та дослідження САК, що реалізує нову, інтелектуально просунуту, функцію	«20» травня 2026 р.	
Реалізація та підготовка до впровадження результатів роботи	«29» травня 2026 р.	
Оформлення додатків та роботи в цілому	«01» червня 2026 р.	
Здача роботи на перевірку керівникові, виправлення зауважень, підпис керівника	«05» червня 2026 р.	
Брошування роботи, представлення її завідувачу кафедри, підпис, направлення роботи на зовнішнє рецензування та захист у ЕК	«12» червня 2026 р.	

Здобувач _____ Михайлов В.О.
ПІБ Підпис, дата

Керівник роботи _____ Світій І.М.
ПІБ Підпис, дата

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ.

Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.

Здобувач _____ Михайлов В.О. _____
Прізвище, ініціали Підпис

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра присвячена дослідженню системи автоматичного керування (САК) процесу витоку зерна з підвагового бункера до лінії завантаження суден з метою удосконалення алгоритмів керування, що повинно забезпечити зменшення вірогідності аварій, гарантувати рівномірне розвантаження підвагового бункера та забезпечити продуктивність процесу, за рахунок впровадження інтелектуальних алгоритмів гарантуючого керування, на основі апарату нечіткої логіки та нейронних мереж. Проаналізована поведінка САК процесом витоку зерна з підвагового бункера типової структури. Виявленні основні недоліки її роботи.

Проведено аналіз особливостей технологічного процесу витоку зерна з підвагового бункера як об'єкту керування. Проведено структурний аналіз та синтез САК процесу витоку зерна з підвагового бункера підвищеної динамічної точності. Запропоновано удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання систем автоматичного керування (САК) на основі застосування апарату нечіткої логіки та штучних нейронних мереж. Проведено синтез САК процесом витоку зерна з підвагового бункера з використанням інтелектуальних алгоритмів гарантуючого керування. У роботі проведено низку порівняльних аналізів САК базової структури та САК, що реалізує функцію гарантуючого керування.

Результати дослідження можуть бути використані на підприємствах харчової промисловості.

Кількість сторінок: 164, кількість рисунків 108, кількість таблиць 7.

Ключові слова: підваговий бункер, система керування, математична модель, перехідний процес, підвищення ефективності, підвищена динамічна точність, нечітка логіка, нейронний регулятор, система гарантуючого керування.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень.....	8
Вступ.....	9
Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.....	10
Розділ 1. Технологічний процес витоку зерна з підвагового бункера до лінії завантаження суден та задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування.....	14
1.1 Опис технологічного процесу та його особливості.....	14
1.2 Параметризація схеми технологічного процесу й загальна характеристика параметрів і їх взаємозалежностей.....	15
1.3 Розробка структурної (координатної) схеми об'єкту керування.....	19
1.4 Наявний комплекс математичних моделей процесу витоку зерна з підвагового бункера до лінії завантаження суден.....	20
1.5 Типові структура й алгоритми САК ТП витоку зерна з підвагового бункера.....	23
1.6 Висновки за розділом 1.....	26
Розділ 2. Удосконалення САР на основі розвитку її алгоритмічної структури.....	27
2.1 Синтез і аналіз САК підвищеної динамічної точності.....	27
2.2 Визначення недоліків існуючих САК і формулювання мети удосконалення систем автоматичного керування процесом витоку зерна з підвагового бункера.....	31
2.3 Обґрунтування нових функцій, які повинні бути реалізовані САК процесом витоку зерна з підвагового бункера.....	32
2.4 Висновки за розділом 2.....	32
Розділ 3. Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання сак на основі застосування апарату нечіткої логіки та штучних нейронних мереж.....	34

3.1 Обґрунтування актуальності застосування систем керування, побудованих на базі апарату нечіткої логіки, для розглянутого об'єкта керування.....	34
3.2 Реалізація в програмному середовищі MATLAB\Simulink моделі каналу регулювання розглянутого об'єкта керування який характеризується нелінійною статичною характеристикою.....	35
3.3 Параметричний синтез САК з традиційним ПІД регулятором для об'єкта який характеризується нелінійною характеристикою каналу регулювання....	37
3.4 Розробка моделі САК з нечітким регулятором (НР) для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою каналу регулювання	42
3.5 Порівняльний аналіз функціонування САК з традиційним ПІД регулятором і САК з нечітким регулятором.....	52
3.6 Обґрунтування актуальності застосування нейромережових алгоритмів керування.....	58
3.7 Розробка моделі САК з нелінійними перетворюючими на основі штучних нейронних мереж.....	61
3.8 Параметрична оптимізація САК з нейрорегулятором.....	86
3.9 Аналіз функціонування різних САК за якістю регулювання за умов впливів, що збурюють.....	91
3.10 Розробка програмного забезпечення для реалізації нейрорегулятора на базі промислового контролера.....	94
3.11 Висновки за розділом 3.....	103
Розділ 4. Удосконалення САК на основі розвитку її функціональної структури.....	104
4.1 Опис загальних принципів побудови модернізованої системи керування.....	104
4.2 Розробка структурної схеми САК та опис принципу її дії.....	107

4.3 Доопрацювання математичної моделі ОР для вирішення задачі синтезу та аналізу системи гарантуючого керування.....	109
4.4 Розробка імітаційної моделі системи гарантуючого керування процесом витоку зерна з підвагового бункера та дослідження її роботи.....	111
4.5 Висновки за розділом 4.....	122
Розділ 5. Реалізація і підготовка до впровадження результатів роботи на підприємстві.....	124
5.1 Існуюча програмно-технічна структура підсистеми автоматичного керування процесом витоку зерна з підвагового бункера до лінії завантаження суден і формулювання задач по її розвитку для впровадження розробок.....	124
5.2 Розробка, налаштування і тестування прикладного програмного забезпечення для реалізації алгоритмів керування.....	131
5.3 Оцінка економічної ефективності впровадження розробок.....	146
5.4 Висновки за розділом.....	146
Висновки.....	148
Список використаної літератури.....	149
Додаток А.....	150
Додаток Б.....	153
Додаток В.....	162

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ТП – технологічний процес;
ПП – перехідний процес;
ПХ - перехідна характеристика;
ОК – об’єкт керування;
САР – система автоматичного регулювання;
САК – система автоматичного керування;
ПДТ – підвищена динамічна точність;
НМ – нечіткі множини;
НР – нейронний регулятор;
ШНМ – штучна нейронна мережа;
СГК – система гарантуючого керування.

ВСТУП

Робота ТОВ «УКРЕЛЕВАТОПРОМ» пов'язана з виконанням виробничих операцій в регульованому середовищі, що забезпечується процесом витоку зерна з підвагового бункера.

Одним з найефективніших шляхів підвищення ефективності процесу витоку зерна з підвагового бункера, підтверджених практикою, є підвищення рівню автоматизації процесу шляхом підвищення інтелектуального рівню системи автоматичного регулювання.

Динамічний розвиток портової логістики та експорту агропродукції України вимагає кардинальної модернізації систем перевалки зернових вантажів. На сучасному етапі ключовим фактором конкурентоспроможності зернових терміналів, таких як ТОВ «УКРЕЛЕВАТОПРОМ», стає швидкість, точність та безперервність навантажувальних процесів.

Технологічна операція випуску зерна з підвагового бункера в лінію завантаження суден є критичним вузлом, що визначає загальну ефективність логістичного ланцюга. Традиційні локальні системи автоматизації вже не забезпечують необхідної адаптивності при зміні фізико механічних властивостей сировини, що призводить до нерівномірності потоку та похибок дозування. У зв'язку з цим виникає гостра потреба інтеграції інтелектуальних алгоритмів керування та сучасних комп'ютерно інтегрованих технологій. Підвищення інтелектуального рівня систем автоматичного регулювання дозволяє мінімізувати динамічні навантаження на транспортні лінії, стабілізувати процес витоку зернової маси та максимізувати пропускну здатність обладнання в умовах строго регульованого виробничого середовища.

Актуальність теми. Найважливішу роль у вирішенні завдань із забезпечення економічної та соціальної безпеки будь-якої країни відіграє зернопереробний комплекс, що включає виробництво зернових культур та їх подальшу переробку. Зернопереробка має не тільки важливе соціально-

економічне значення, а й політичне для розвитку національної економіки та забезпечення продовольчої безпеки держави. Зерно завжди належало до конкурентоспроможних продуктів на світовому ринку. Однією з характерних особливостей зернопереробка є те, що один і той же продукт може використовуватись за різним призначенням.

Зернопереробний комплекс, будучи відкритою системою, взаємодіє з іншими сферами промисловості, споживаючи продукцію сполучених галузей (машинобудування, хімічна промисловість тощо), залучаючи ресурси фінансової системи та забезпечуючи цим задоволення потреб у продуктах харчування. Тобто, забезпечення ефективного розвитку цього сегмента дозволить найбільш повно задовольняти найперші потреби населення та стимулювати розвиток інших соціально-економічних систем.

Оскільки зерно не тільки фігурує в рамках внутрішнього споживання, але й експортується за кордон, дуже важливим є забезпечення умов його транспортування і збереження його споживних властивостей. В основному транспортування продукту забезпечується водним транспортом. Технологічний процес завантаження суден зерном вимагає якомога більшої стабільності за умови заданої продуктивності поточно-транспортної системи (ПТС). На практиці цей процес здійснюється вручну, - продуктивність конвеєрів, ступінь відкриття засувки тощо виставляються, керуючись досвідом оператора. Процес часто супроводжується нештатними зупинками ПТС з причини перевантаження лінії, просипання зерна тощо, тобто має низьку ефективність. Для підвищення ефективності процесу, зниження витрат через нештатні простоювання лінії, втрати зерна при транспортуванні тощо процесом завантаження суден зерном треба керувати з використанням сучасних засобів автоматизації. Тому, автоматизація процесу завантаження суден зерном є актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в Одеському національному технологічному університеті (ОНТУ) та відповідає напрямку №4 наукової діяльності ОНТУ «Створення нового

високоєфективного обладнання, автоматизація виробничих процесів харчових і зернопереробних виробництв», а також напряму наукової школи ОНТУ: «Моделювання та оптимальне керування технологічними процесами зберігання та переробки сільськогосподарської сировини».

Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є підвищення ефективності процесу витоку зерна з підвагового бункера шляхом компенсації нестабільності продуктивності поточно-транспортної системи.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання:

- аналіз процесу витоку зерна з підвагового бункера як об'єкту керування;
- розробка комплексу моделей процесу витоку зерна як об'єкту регулювання і проведення моделювання для підтвердження відповідності отриманих моделей експериментальним даним;
- розробка варіантів алгоритмів регулювання, проведення їх параметричної оптимізації, порівняльного аналізу САР, синтезу та аналізу САР підвищеної динамічної точності;
- розробка САК з використанням нейронного регулятора та САК з регулятором на нечіткій логіці;
- розробка структури та імітаційне моделювання системи гарантуючого керування витоком зерна з підвагового бункера.

Об'єкт дослідження – керований технологічний процес витоку зерна з підвагового бункера.

Предмет дослідження – системи автоматичного керування технологічним процесом витоку зерна з підвагового бункера, включаючи моделі процесу як об'єкта керування.

Методи дослідження:

Основним використаним методом дослідження є метод системного аналізу. Для ідентифікацій моделей використано методи активного та пасивного експерименту, метод типової статистичної ідентифікації та

інженерні методики ідентифікації моделі об'єкта керування (ОК). При синтезі САР було використано методи теорії автоматичного керування, а саме інженерні методики параметричного синтезу САР, оптимального параметричного синтезу, принцип інваріантності до передісторії заданого значення, а також теорії нечіткої логіки, нейромережових систем і імітаційного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів:

вперше обґрунтовано:

- загальну концепцію побудови системи гарантуючого керування витоком зерна з підвагового бункера;
- вперше формалізовано алгоритм нейромережового керування процесом витоку зерна з підвагового бункера на основі задачі нечіткого керування;
- отримала подальший розвиток методика перетворення нечіткого регулятора до нейромережового алгоритму керування на основі дослідження процесу керування стерилізації томатного соку;
- загальну концепцію побудови САК підвищеної динамічної точності (інваріантної до передісторії заданого значення) для процесу витоку зерна з підвагового бункера;
- доцільність аналізу процесу витоку зерна з підвагового бункера як об'єкту керування;

вперше розроблено:

- структуру та імітаційну модель системи нейромережового керування витоком зерна з підвагового бункера на основі задачі нечіткого керування;
- структуру та імітаційну модель системи гарантуючого керування витоком зерна з підвагового бункера;
- комплекс моделей процесу витоку зерна як об'єкту регулювання;
- варіанти алгоритмів регулювання базової структури та підвищеної динамічної точності для САК процесом витоку зерна з підвагового бункера;

– регламент функціонування та алгоритм пуску САК процесом витоку зерна з підвагового бункера;

Практичне значення одержаних результатів полягає в:

– підвищення ефективності процесу витоку зерна з підвагового бункера;
– зниження ймовірності виникнення нештатних простоювань ПТС відвантаження зерна на судно;

– зниження втрати зерна при транспортуванні;
– підвищення економічної ефективності роботи ПТС відвантаження зерна на судно;

– забезпечення гарантованого запобігання аварійним ситуаціям, пов'язаним з порушенням обмежень на регламентовані змінні;

– можливості застосування розроблених та відтворених у імітаційному середовищі підходів до створення САК, включаючи їх функціональний склад, структури та алгоритми підсистем, для підвищення продуктивності ПТС відвантаження зерна на судно;

– застосування розробленої імітаційної моделі для подальшого удосконалення САК процесом витоку зерна з підвагового бункера, а також технології та досвіду розробки цієї моделі для створення моделей процесу витоку зерна інших типів.

Особистий внесок здобувача: сформульовано найбільш загальні особливості процесу витоку зерна з підвагового бункера як об'єкта керування, його структура і задачі керування; обґрунтовано сукупність функцій робочого місця дослідника процесу витоку зерна з підвагового бункера; побудовано концептуальну структуру процесу витоку зерна, розкрито взаємозв'язки між змінними процесу; властивості його каналу регулювання; обґрунтовано алгоритм ідентифікації моделі процесу; модель реалізована в середовищі імітаційного моделювання Matlab; обґрунтовано її адекватність; обґрунтовано функціональну структуру САК; її альтернативні структури, алгоритми керування; Розроблені та дослідженні варіанти САК з нечітким регулятором, нейронним регулятором та САК с функцією гарантування.

РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ВИТОКУ ЗЕРНА З ПІДВАГОВОГО БУНКЕРА ДО ЛІНІЇ ЗАВАНТАЖЕННЯ СУДЕН ТА ЗАДАЧІ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСОБАМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

1.1 Опис технологічного процесу та його особливості

Суть технологічного процесу – це цілеспрямоване перетворення продуктових і енергетичних потоків у спеціальному технологічному устаткуванні (ТУ) (машинах, апаратах, агрегатах). Технологічна схема процесу наведена на рис. 1.1.

З ліній прийому зерна з залізничного транспорту продукт потрапляє в бункерні ваги ВБ 2 для зважування, з яких зерно (пшениця, ячмінь, ріпак, горох і т.п.) переміщується конвеєром КС5, після чого воно надходить у черевик норії КН4, переміщення сипких матеріалів системою ковшів, нескінченною стрічкою, з якої зерно піднімається до конвеєра КС4 і транспортується в сепаратор СП для обробки зернових культур, потім потрапляє на конвеєр КЛ1 і вже з нього в спеціальну судновантажну машину СПМ через яку продукт далі надходить у трюми вантажного корабля.

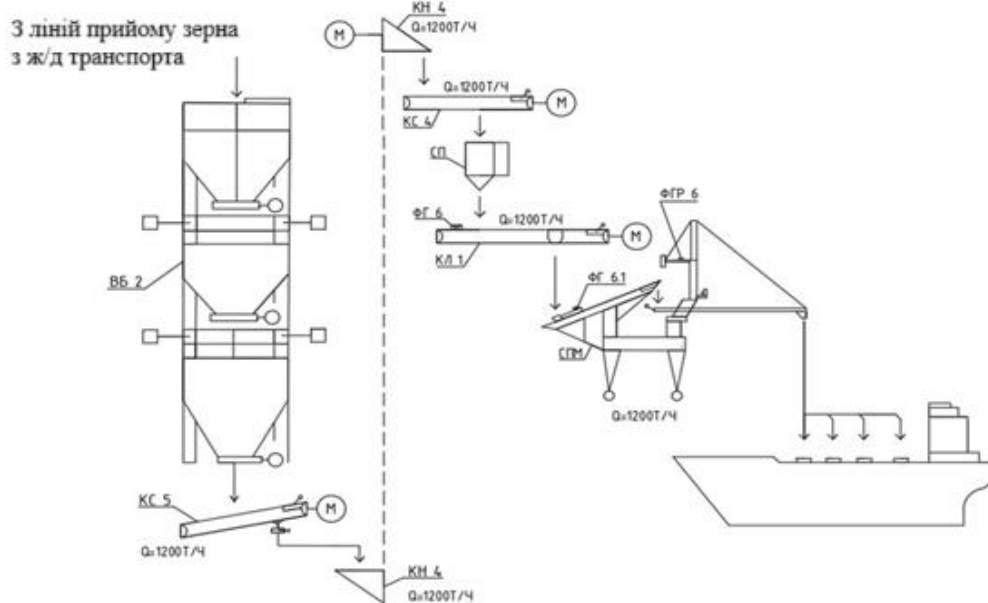


Рис. 1.1 – Технологічна схема керування процесом витоку зерна з підвагового бункера до лінії завантаження суден

1.2 Параметризація схеми технологічного процесу й загальна характеристика параметрів і їх взаємозалежностей

Мета ведення процесу – отримання заданих продуктів із заданими властивостями (показниками якості). При промисловому виробництві досягнення мети може бути виправдане лише тоді (тобто ТП має сенс реалізувати), коли виконується низка вимог до ТП.

Параметризація схеми технологічного процесу і загальна характеристика параметрів і їх взаємозалежностей.

Проведемо параметризацію технологічної схеми. Результати параметризації наведені на рис. 1.2.

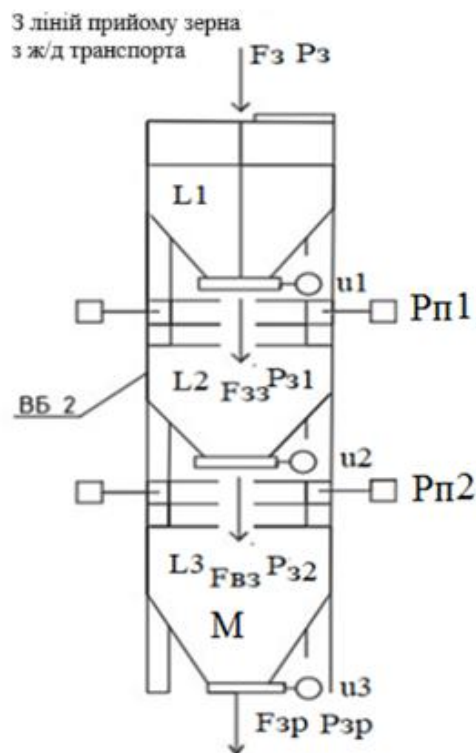


Рис. 1.2 – Параметризована технологічна схема бункерних вагів

F_z - витрата зерна кг/с;

P_z - тиск зерна після конвеєра Мпа;

L1 – рівень бункера 1;

Pп1 - Контроль тиску пневмомережі 1

U1 - керуюча дія пневмо-заслінки 1-го бункера;
Pзз - тиск зерна після 1-го бункера;
L2 – рівень бункера 2;
Fзз - витрата засипного зерна у другому бункері;
Pз1 - тиск зерна після 1-го бункера Мпа;
Pп2 - Контроль тиску пневмомережі 2;
U2 - керуюча дія пневмо-заслінки 2-го бункера;
L3 – рівень бункера 3;
Fвз - Витрата зваженого зерна в третьому бункері;
Pз2 - тиск зерна після 2-го бункера Мпа;
Pг - тиск контролю гідромережі;
U3 - керуюча дія пневмо-заслінки 3-го бункера;
M – маса бункера;
Fзр - витрата розвантаженого зерна кг/с;
Pзр - тиск розвантаженого зерна після 3-го бункера Мпа;
Основу нормативів складають три основних регламенти.

Технологічний регламент – визначає умови, при яких у результаті технологічного процесу буде отримано продукт із заданими властивостями. Він являє собою набір номінальних значень і допусків на відхилення від номіналу технологічних параметрів. Для технологічного процесу таким параметром є витрата розвантаженого зерна Fзр, тиск розвантаженого зерна після 3-го бункера Pзр, витрата засипного зерна у другому бункері Fзз, витрата зваженого зерна в третьому бункері Fвз.

Експлуатаційний регламент – визначає умови нормальної безаварійної роботи технологічного обладнання. Він являє собою набір номінальних значень і допусків на відхилення експлуатаційних параметрів технологічного обладнання. Для цього є параметр контроль тиску пневмомережі 1 Pп1, контроль тиску пневмомережі 2 Pп2, тиск контролю пневмомережі 3 Pг, маса бункера M.

Техніко-економічний і екологічний регламент визначає умови ефективності ведення процесу і його екологічності. Він являє собою набір номінальних та гранично-припустимих значень техніко-економічних і екологічних параметрів. До цієї групи параметрів можна віднести тиск зерна після 1-го бункера Рз1, тиск зерна після 2-го бункера Рз2.

Відхилення параметрів технологічного процесу від регламентних значень, що викликані зміною параметрів, характеризують умови ведення процесу навіть при досить ефективному керуванні процесом, можуть перевищувати встановлені допуски. Допуски на відхилення поточних (режимних) значень регламентованих параметрів від номінальних прийнято розділяти і задавати у вигляді допусків на тривалі та короткочасні відхилення. Аналіз нормативів ведення технологічного процесу та експлуатації обладнання оформимо у вигляді таблиці регламентів 1.1.

Таблиця 1.1 – Таблиця регламентів

Назва параметрів	Позначення	Одиниці вимірювання	Номінальне значення параметру або ф-ція зміни номінального значення	Припустимі відхилення від номіналу		
				Тривалі (t ® ¥)	Короткочасні (0 < t << ¥)	
				величина	величина	час, сек
Маса	М	Т	$- 0,027t + M_0$	$\pm 0,02$	$\pm 0,1$	8

Виявлення параметрів, що характеризують умови ведення технологічного процесу та експлуатації технологічного агрегату. Поточні значення нормативних параметрів завжди відрізняються від номінальних (і можуть виходити за межі допусків) внаслідок зміни умов, у яких ведеться процес. Ці умови також характеризуються певними параметрами і можуть бути (для зручності) згруповані за деякими ознаками. Сировинні параметри характеризують властивості продукту, що йде на переробку. До цієї групи

параметрів віднесемо параметри витрата зерна F_z , тиск зерна після конвеєра P_z .

Енергетичні параметри характеризують енергію, що підводить до технологічного встаткування ззовні й витрачається на зміну властивостей продуктів. До цієї групи параметрів віднесемо рівень бункера 1 L_1 , рівень бункера 2 L_2 , рівень бункера 3 L_3 . Механічні (або інші специфічні) параметри технологічного обладнання характеризують стан її робочих органів. До цієї групи параметрів віднесемо керуюча дія пневмо-заслінки 1-го бункера U_1 , керуюча дія пневмо-заслінки 2-го бункера U_2 , керуюча дія пневмо-заслінки 3-го бункера U_3 .

Параметризована схема ТП має змістовний характер. Формалізація опису взаємозв'язків між параметрами ТП досягається за рахунок переходу до формалізованої параметричної схеми ТП. При цьому ті параметри, які відображають мету функціонування об'єкту моделювання та додаткових вимог до нього, тобто регламентовані параметри будуть вихідними, а параметри, що відображають умови функціонування об'єкту - вхідними. Зв'язок між вхідними і вихідними параметрами – причинно-наслідковий. У рамках даної схеми ці зв'язки задаються тільки на якісному рівні, згодом деякими зв'язками можна буде знехтувати, деякі представити опосередковано. Параметрична схема процесу наведена на рис. 1.3.

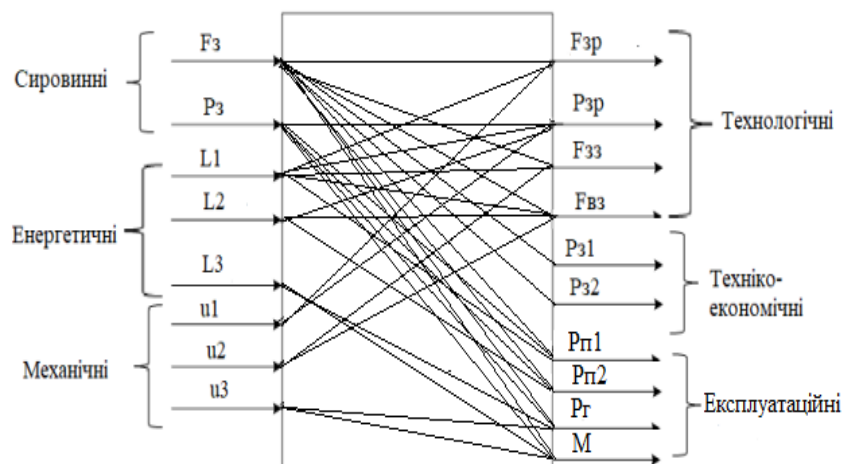


Рис. 1.3 – Параметрична схема технологічного процесу витоку зерна з підвагового бункера

1.3 Розробка структурної (координатної) схеми об'єкту керування

Загальною метою функціонування підприємства в цілому є виконання планових завдань або договірних зобов'язань щодо номенклатури та обсягу продукції, а також отримання при цьому певного економічного ефекту.

Для процесу керування витоком зерна з підвагового бункера в якості регульованих координат доцільно обрати масу зерна в підваговому бункері M .

До керуючих дій доцільно віднести положення регулюючого органу засувки (u).

Після того, як визначені керуючі дії, всі інші вхідні змінні відносять у розряд збурень, тобто таких дій середовища, зміна яких порушує хід технологічного процесу і режими роботи технологічного агрегату.

Для процесу керування витоком зерна з підвагового бункера не було виявлено збурень, враховуючи які можна суттєво покращити якість регулювання, тому всі вхідні дії, крім керуючих дій, віднесемо до неконтрольованих збурень f_d та f_c . Детерміновану складову цих збурень адитивно прикладемо до керуючих дій, а стохастичну складову – до регульованої координати.

Структурна схема ОК є черговим і останнім етапом формалізації подання технологічного процесу як ОК. Структурна схема ОК, по суті, є найбільш загальною (концептуальною) моделлю технологічного процесу як ОК. Структурна схема процесу наведена на рис. 1.4.

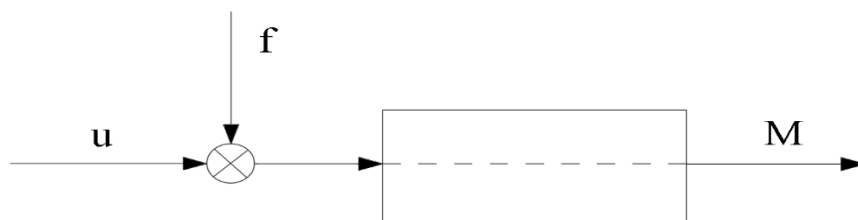


Рис. 1.4 – Структурна схема процесу витоку зерна з підвагового бункера як об'єкту регулювання

На рисунку:

u – положення регулюючого органу;

M – маса зерна в підваговому бункері;

f – вектор неконтрольованих збурень.

1.4 Найявний комплекс математичних моделей процесу витоку зерна з підвагового бункера до лінії завантаження суден

У результаті виконання випускної роботи бакалавра було отримано комплекс математичних моделей статички, динаміки та неконтрольованих збурень процесу витоку зерна з підвагового бункера [5].

Схему моделювання повної моделі ОК наведено на рис. 1.5.

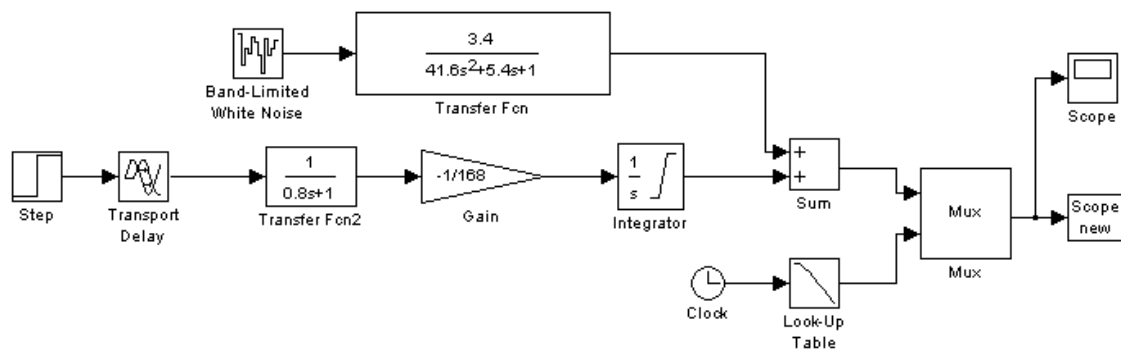


Рис. 1.5 – Схема моделювання повної моделі ОК

Для моделей динаміки за каналом регулювання отримано передатні функції першого та другого порядку.

Передаточна функція моделі 1-го порядку ОК має вигляд:

$$W_o(p) = \frac{e^{-1,5p}}{-168p} = e^{-1,5p} \cdot \frac{-1}{168p}$$

Передаточна функція моделі 2-го порядку ОК має вигляд:

$$W_o(p) = \frac{e^{-0,8p}}{-168p \times (0,8p + 1)} = e^{-0,8p} \cdot \frac{-1}{168p} \cdot \frac{1}{0,8p + 1}$$

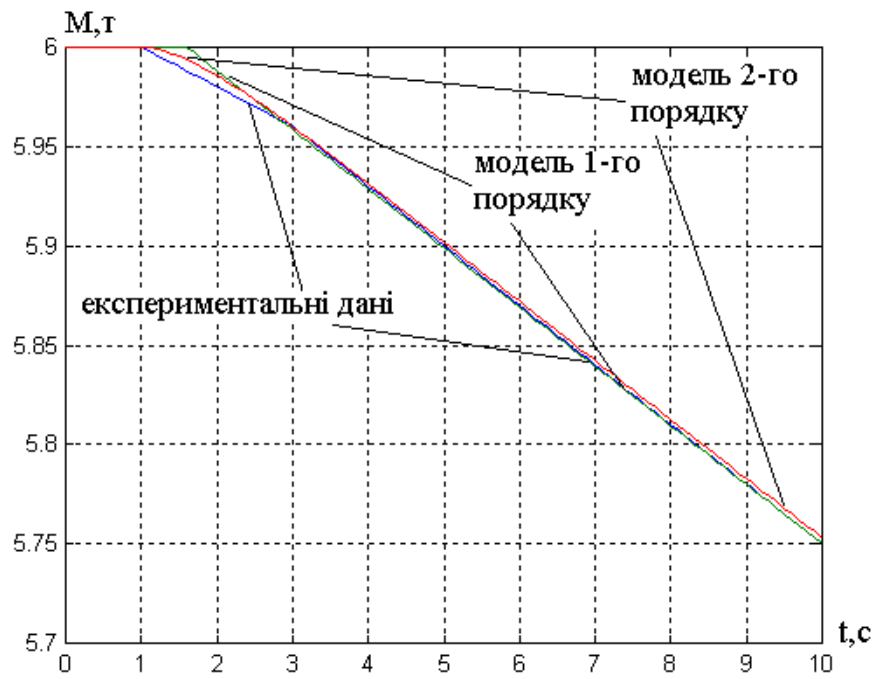


Рис. 1.6 – Результати моделювання ОК по каналу

Як видно з рис. 1.6, моделі ОК як 1-го, так і 2-го порядків досить точно описують експериментальні дані.

Для реалізації неконтрольованих збурень випадкового характеру було використано блок БВП з такими параметрами:

$$\text{Noise power} = s_x(w) = 0,017$$

$$\text{Sample time} = \Delta t_r = 6 \text{ с}$$

$$\text{Seed} = 1$$

А також був використаний формуючий фільтр з функцією

$$W_{\phi\phi}(p) = \frac{3,4}{41,6p^2 + 5,4p + 1}$$

Результати моделювання неконтрольованих збурень наведені на рис.

1.7.

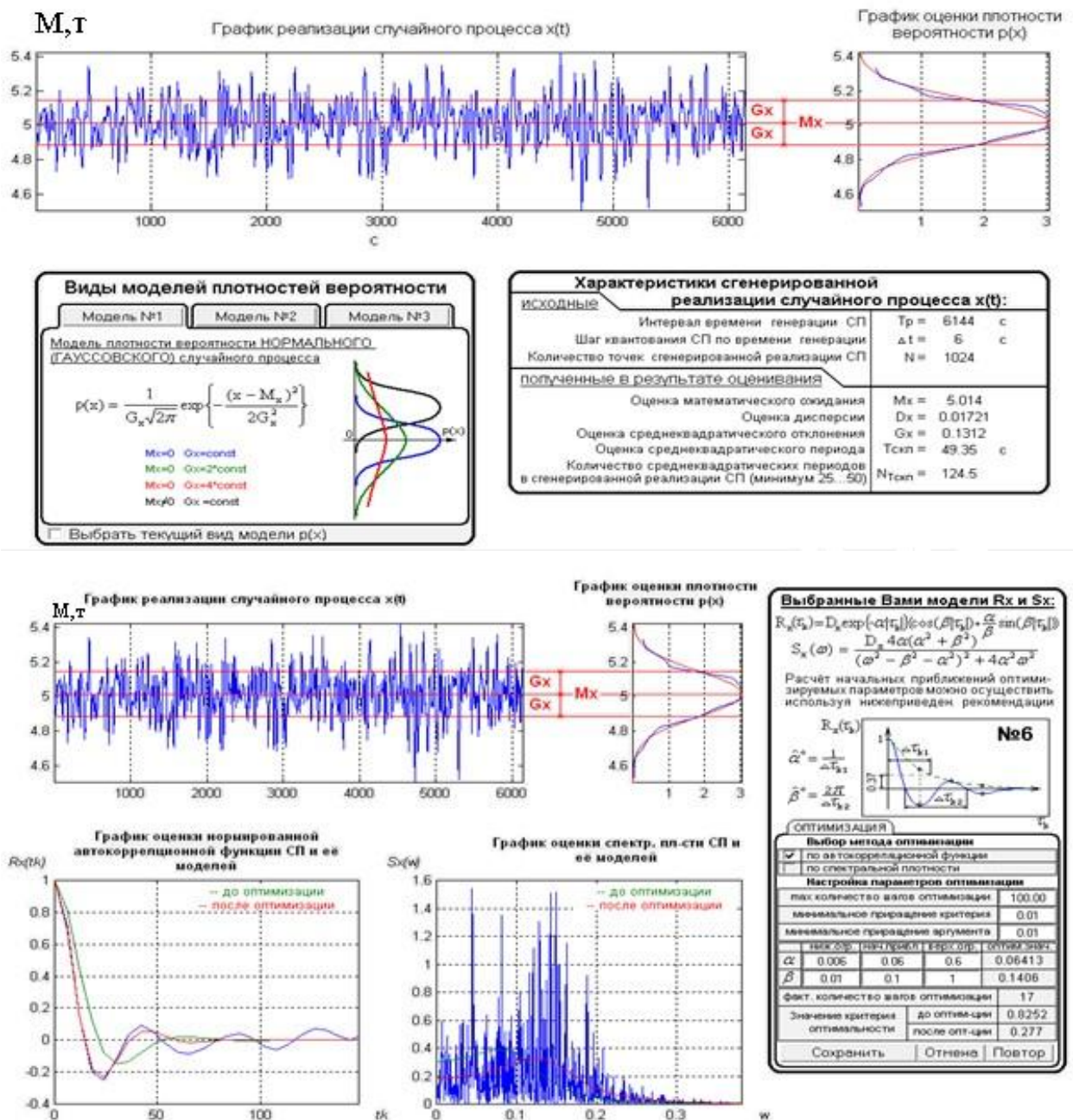


Рис. 1.7 – Результати моделювання неконтрольованих збурень

Як показують результати експериментів, модель ОК в достатній мірі відтворює результати експериментальних досліджень.

1.5 Типові структура й алгоритми САК ТП витоку зерна з підвагового бункера

У результаті виконання випускної роботи бакалавра було розроблено САР базової структури на основі ПІ та ПІД алгоритмів регулювання [5]. Було проведено структурний та оптимальний параметричний синтез САР базової структури на основі ПІ та ПІД алгоритмів регулювання, з наступними параметрами налаштувань:

$$K_r = -158,8323, T_{iz} = 11,9521;$$

$$K_r = -178,8138, T_{iz} = 2,9795, T_{pr} = 0,8581.$$

При цьому структурна схема моделювання САР з ПІ-регулятором наведена на рис. 1.8, а САР з ПІД-регулятором - на рис. 1.9. Результати порівняння варіантів САР наведені на рис. 1.10 і в таблиці 1.2.

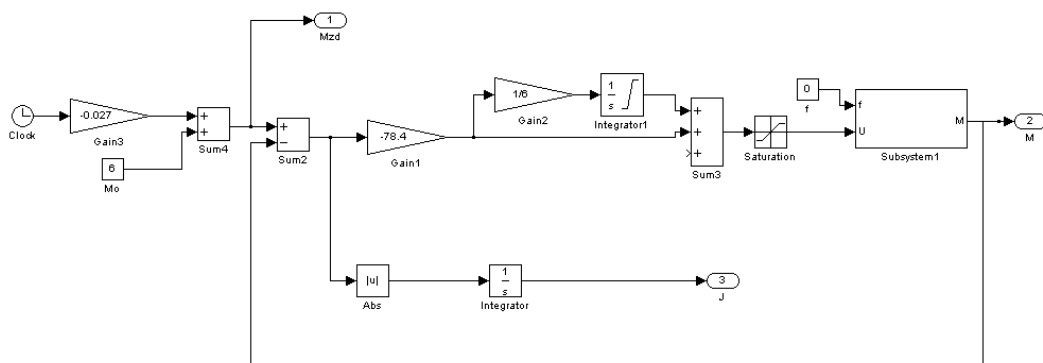


Рис. 1.8 – Структурна схема моделювання САР з ПІ-регулятором

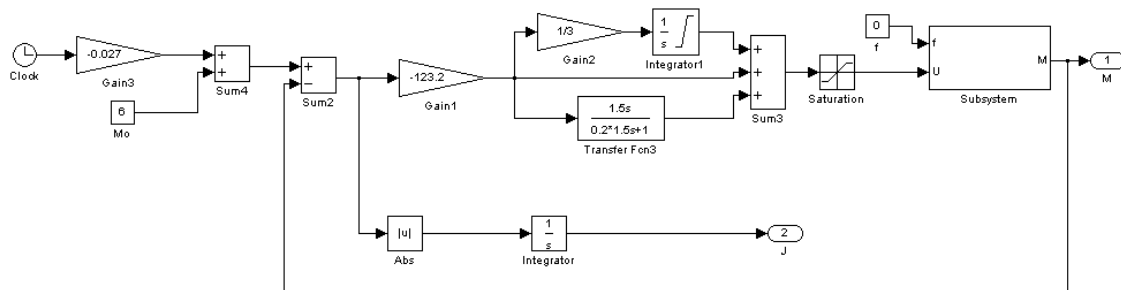


Рис. 1.9 – Структурна схема моделювання САР з ПІД-регулятором

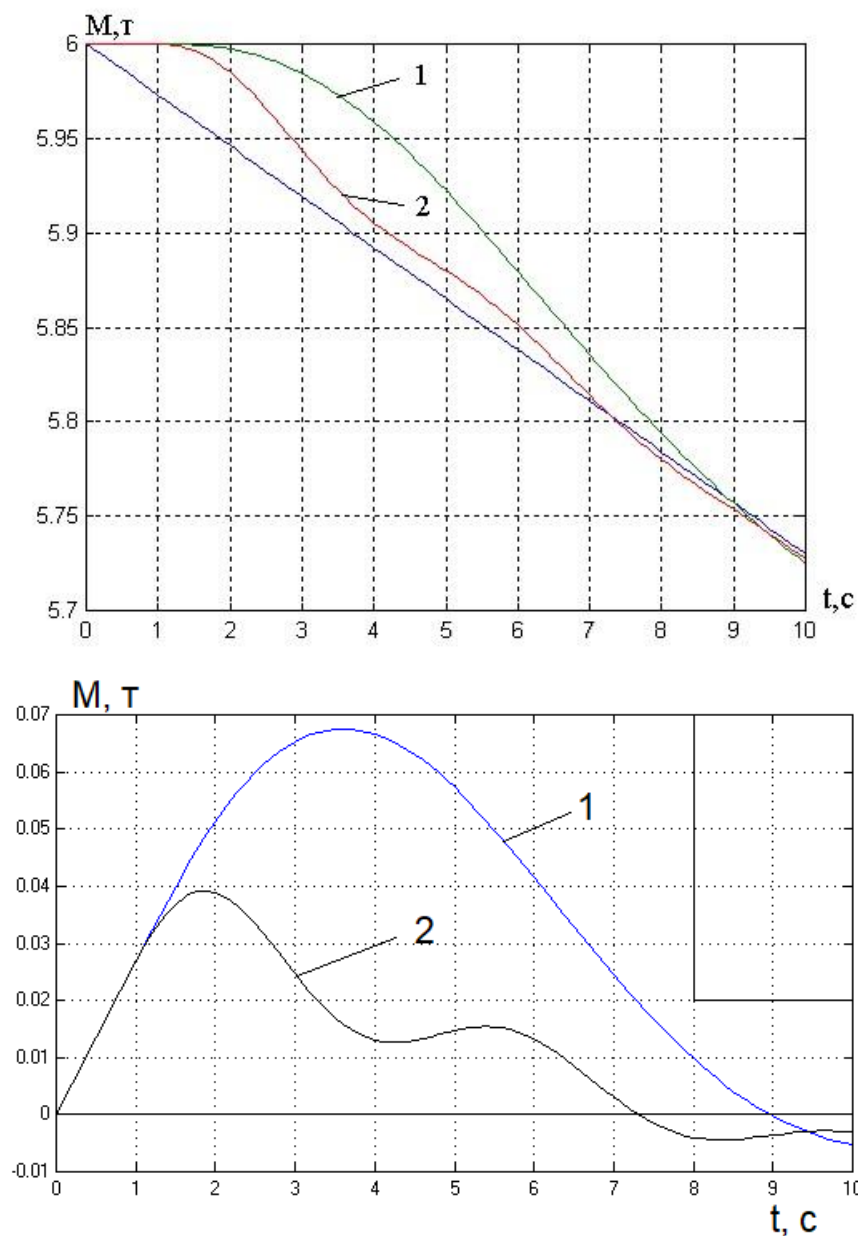


Рис. 1.10 – Результати порівняння варіантів САР: 1 – САР з ПІ-регулятором; 2 – САР з ПІД-регулятором

Таблиця 1.2 – Результати порівняння варіантів САР

Алгоритм регулювання	Прямі показники якості		Критерій
	$\Delta M^{\text{МАКС}}$	$T_{\text{пп}}, \text{с}$	
ПІ	0,0675	7,28	0,349
ПІД	0,0392	3,28	0,1455

Як видно з результатів порівняння перехідних процесів, САР з ПІД-

регулятором є кращою за усіми показниками. Тому ПД-закон регулювання будемо використовувати і надалі. Результати оцінки САР з ПІ-регулятором на грубість наведені на рис. 1.11, а САР з ПД-регулятором – на рис. 1.12. Як видно з результатів, САР і з ПІ-регулятором і з ПД-регулятором є грубою.

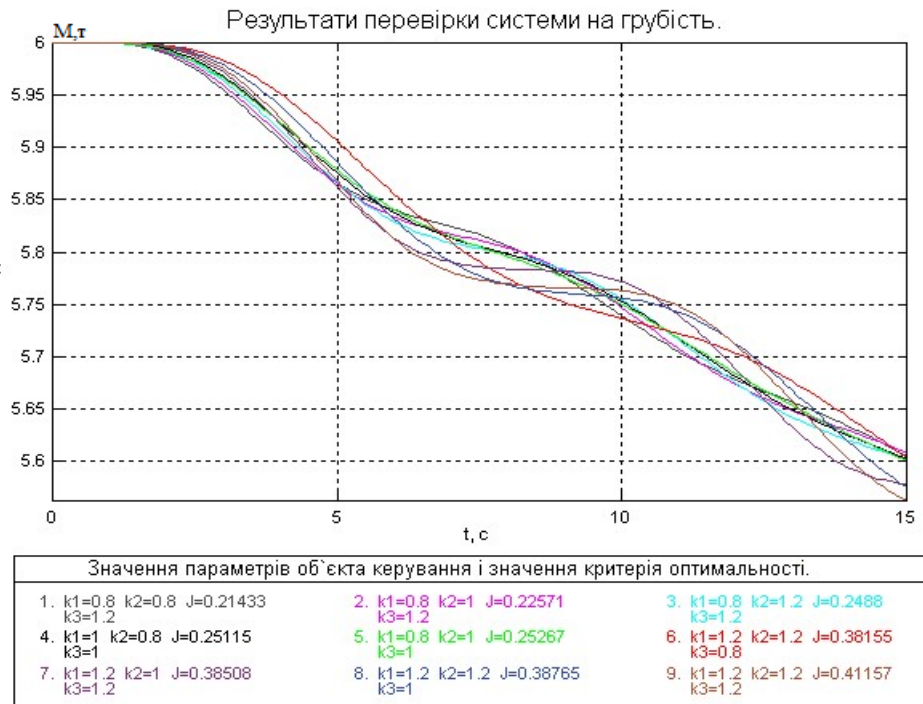


Рис. 1.11 - Аналіз на грубість САР з ПІ-регулятором

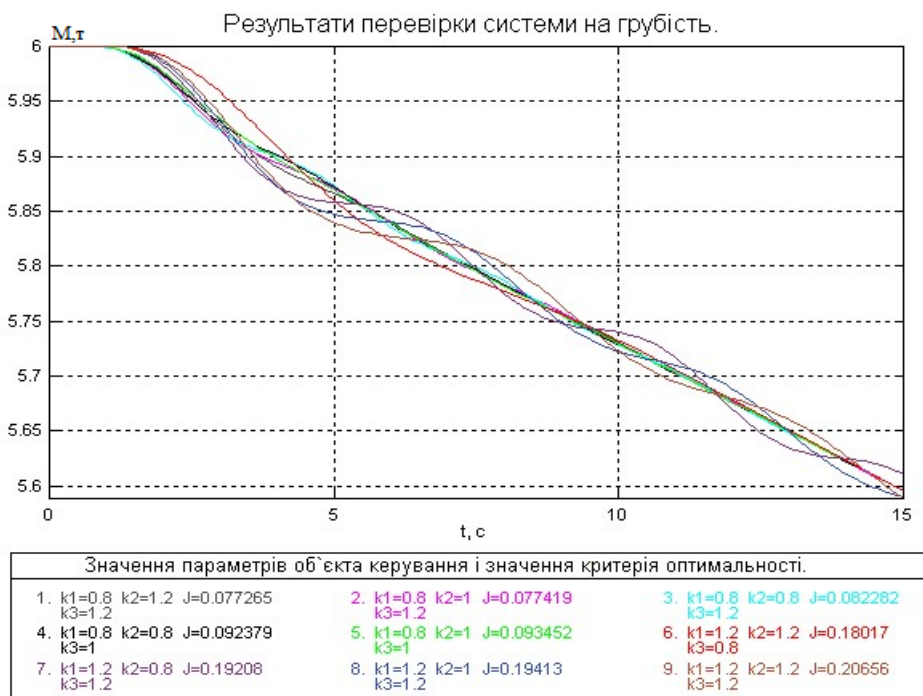


Рис. 1.12 - Аналіз на грубість САР з ПД-регулятором

Як видно з результатів оцінки САР на грубість, "найсприятливішим" для керування сполученням параметрів ОК є більший на 20% час запізнення ОК, а "найнесприятливішим" для керування сполученням - на 20% менший час запізнення.

1.6 Висновки за розділом 1

Якісна реалізація технологічного процесу керування витоком зерна з підвагового бункера залежить від точності підтримки режимного параметра: маси зерна в підваговому бункері.

За каналом об'єкт має астатичні властивості і найбільш точно може бути описаний моделями другого порядку. Ідентифікація моделей каналів ОК, доступних для цілеспрямованої дії, проводилася методом активного експерименту з нанесенням на вхід каналу ступінчастої дії, для параметричної ідентифікації моделей каналу керування застосовувалися методики двох загальних точок для моделей першого і другого порядку.

Відтворення отриманих моделей у середовищі імітаційного моделювання здійснювалося в середовищі моделювання MATLAB.

Далі ця модель була використана для синтезу САР базової структури, а потім і підвищеної динамічної точності.

РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ САР НА ОСНОВІ РОЗВИТКУ ЇЇ АЛГОРИТМІЧНОЇ СТРУКТУРИ

2.1 Синтез і аналіз САК підвищеної динамічної точності

У результаті виконання випускної роботи бакалавра було розроблено САР підвищеної динамічної точності [5].

Причиною недостатньої точності САР можуть бути зовнішні умови: дія інтенсивних контрольованих і неконтрольованих збурень, інтенсивна зміна завдання САР, а також внутрішні особливості ОК і САР (значне співвідношення t_0 / T_0 , взаємний вплив каналів в багатовимірної САР).

У нашому випадку основною причиною недостатньої динамічної точності САР є передісторія заданого значення.

Основним шляхом підвищення динамічної точності саме розглянутої САР є побудова САР, інваріантної до передісторії заданого значення.

Відповідно структурна схема САР, інваріантна до передісторії заданого значення наведена на рис. 2.1.

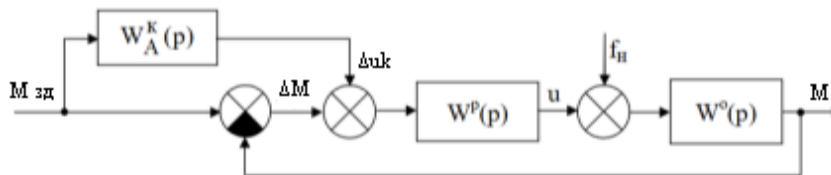


Рис. 2.1 – Структурна схема САР підвищеної динамічної точності

Інваріантність регульованої змінної у відносно передісторії заданого значення уЗД означає, що помилки відтворення в системі дорівнюють нулю

$$\Delta M_{\text{відт}} | M^{\text{зд}} = 0, \forall t > 0$$

Передатна функція фізично реалізованого коригувального зв'язку матиме вигляд:

$$W^K(p) = \frac{1,65p + 1}{0,15p + 1} \times \frac{2,8p^2}{2,5p^2 + 2,97p + 1}$$

Спрощена передаточна функція коригуючого зв'язку матиме вигляд:

$$W^K(p) = K_K \cdot \frac{T_K p}{T_K p + 1}$$

Представимо передаточну функцію з'єднанням типових ланок. Схема моделювання спрощеного коригуючого зв'язку на рис. 2.2.

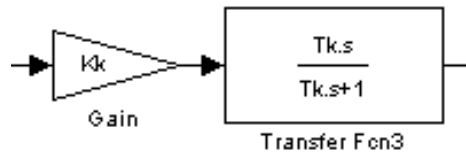


Рис. 2.2 – Структурна схема моделювання спрощеного коригуючого зв'язку

В якості початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку приймемо такі значення параметрів: $K_K = 1,9$; $T_K = 1,5$.

Проведемо оптимізацію параметрів регулятора та коригуючого зв'язку в умовах параметричної невизначеності ОК.

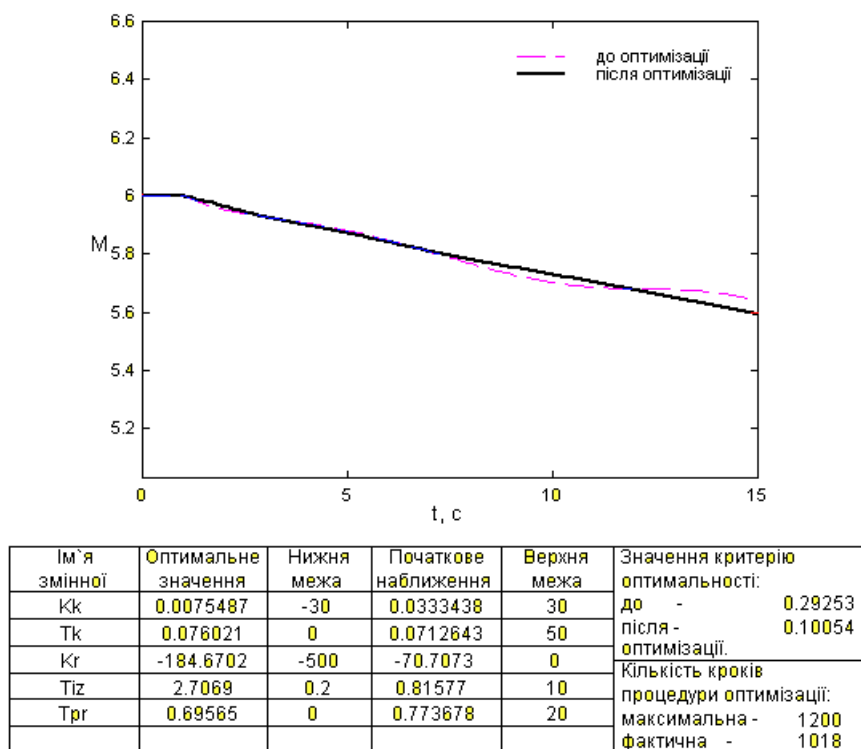


Рис. 2.3 – Результати оптимізації САР підвищеної динамічної точності в умовах параметричної невизначеності параметрів ОК

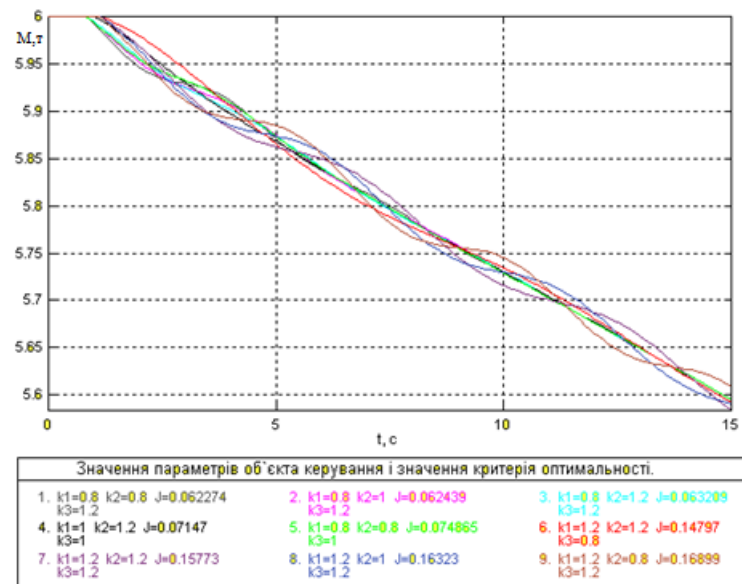


Рис. 2.4 – Аналіз САР підвищеної динамічної точності на грубість

Як видно з результатів оцінки САР на грубість, в умовах варіації параметрів ОК САР дає перехідні процеси, що сходяться, а значить, САР є грубою.

Для порівняння якості роботи САР базової структури і САР підвищеної динамічної точності розроблено структурну схему моделювання, наведену на рис. 2.5 – 2.7. В якості САР базової структури розглядається САР з ПІД-регулятором (рис. 2.6). Результати порівняння наведені на рис. 2.8 і в таблиці 2.1.

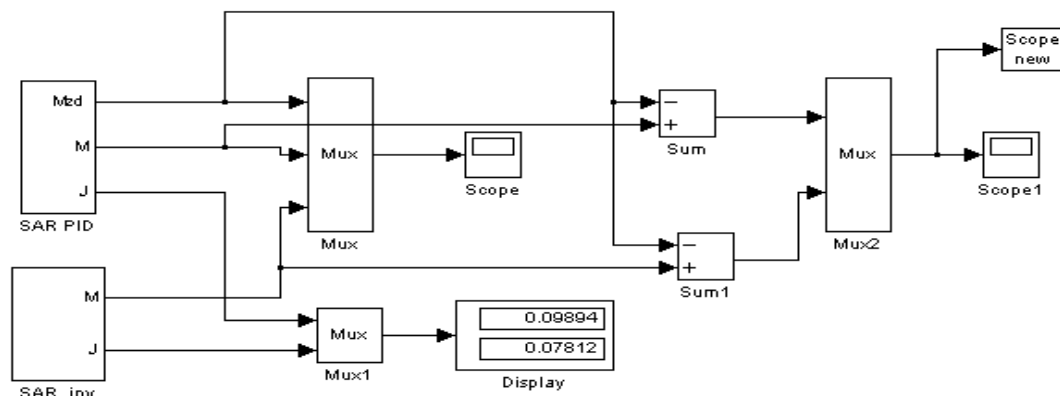
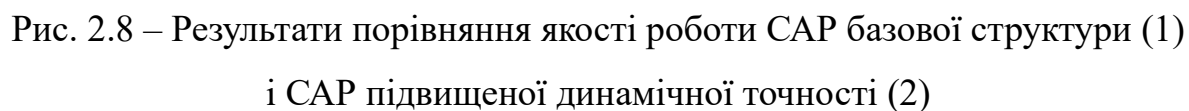
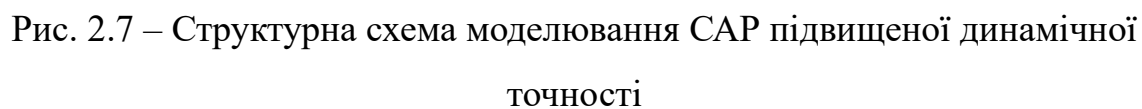


Рис. 2.5 – Структурна схема моделювання для порівняння якості роботи САР базової структури і САР підвищеної динамічної точності



Таблиця 2.1 – Результати порівняння варіантів САР

Алгоритм регулювання	Прямі показники якості		Критерій
	$\Delta M^{\text{МАКС}}$	Т _{пп} , с	
ПД	0,0376	2,9	0,099
Інваріантна	0,027	1,83	0,078

2.2 Визначення недоліків існуючих САК і формулювання мети удосконалення систем автоматичного керування процесом витоку зерна з підвагового бункера

Розглянуті у пункті 2.1 варіанти САК процесом витоку зерна з підвагового бункера обмежуються функціями регулювання маси. Для регулювання маси реалізовано інваріантний принцип керування до передісторії заданого значення. В умовах дії збурень маса у підваговому бункері буде підтримуватися на заданому значенні з досить високою динамічною точністю. Але в існуючих системах недоліком є те що залишається ризик виникнення аварійної ситуації, а саме стрімкого неконтрольованого зсипання зерна з бункера, в умовах випадкових вхідних дій (різна кількість нової порції зерна, зміна параметрів ОК). Також в існуючих системах відсутні функції, що забезпечують цілеспрямоване підвищення техніко-економічних показників процесу витоком зерна з підвагового бункера, та в умовах дії параметричних збурень вони не гарантують рівномірне розвантаження бункера, під час витоку зерна з підвагового бункера, зокрема за рахунок підтримки маси поблизу нижньої межі регламенту без її порушення. Тому метою удосконалення САК процесом витоку зерна з підвагового бункера є: гарантувати рівномірне розвантаження бункера під час витоку зерна з нього, при одночасному відновленні продуктивності та гарантувати недопущення різкого обвалу зерна за рахунок реалізації функції гарантуючого керування маси у підваговому бункері.

2.3 Обґрунтування нових функцій, які повинні бути реалізовані САК процесом витоку зерна з підвагового бункера

Технологічним регламентом процесу витоку зерна з підвагового бункера встановлено нижнє обмеження на масу. Підтримка маси ближче до нижньої межі регламенту без її порушень дозволить забезпечити рівномірне розвантаження бункера. Система не допустить різкого обвалу зерна за рахунок реалізації функції гарантуючого керування маси у підваговому бункері.

Отже треба вдосконалити систему для реагування на зміну початкових умов з кожним циклом, вона буде гарантувати рівномірне розвантаження бункера та гарантувати недопущення різкого обвалу зерна. Тобто в умовах постійної зміни заданого значення та координатних випадкових збурень маса в бункері буде підтримуватися з високою динамічною точністю.

Рішення поставленого завдання є не тривіальним і може бути досягнуто при реалізації системи гарантуючого керування. Реалізація системи гарантуючого керування витоком зерна з підвагового бункера вимагатиме доповнення існуючих функцій САК новою функцією: функцією гарантуючого керування. Етапи розробки модернізованої системи керування будуть розглянуті в наступних розділах.

2.4 Висновки за розділом 2

САР з ПД-регулятором в перехідних режимах задовольняє гранично припустимим вимогам, а САР з ПІ-регулятором не задовольняє цим вимогам за максимальним динамічним відхиленням. САР базової структури в сталих режимах не виходить за рамки зони незначних відхилень.

Введення до алгоритму регулювання Д-складової призводить до зменшення інтегрального критерію на 58%.

САР підвищеної динамічної точності задовольняє гранично припустимим вимогам. Після підвищення динамічної точності САР

інтегральний критерій зменшився на 21%, максимальне динамічне відхилення зменшилося на 28%, час перехідного процесу зменшився на 37%.

SAR підвищеної динамічної точності є грубою.

Оскільки для SAR підвищення динамічної точності дає суттєве покращення показників якості регулювання у порівнянні з SAR базової структури, SAR підвищеної динамічної точності використовувати доцільно.

РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ АПАРАТУ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ ТА ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

3.1 Обґрунтування актуальності застосування систем керування, побудованих на базі апарату нечіткої логіки, для розглянутого об'єкта керування

В основу концепції інтелектуальності покладене вміння працювати з формалізованими знаннями людини (експертні системи, нечітка логіка), або властиві людині навчання і мислення (штучні нейронні мережі і генетичні алгоритми). Нечітке керування (керування на основі методів теорії нечітких множин) використовується при недостатньому знанні об'єкта керування, але наявності досвіду керування їм, також нечітке керування використовується у нелінійних системах, ідентифікація яких занадто трудомістка, а також у випадках, коли за умовою завдання необхідно використовувати знання експерта. Прикладом може бути доменна піч або ректифікаційна колона, математична модель яких містить багато емпіричних коефіцієнтів, що змінюються в широкому діапазоні. У той же час кваліфікований оператор досить добре керує такими об'єктами, користуючись показаннями приладів і накопиченим досвідом.

Виходячи з вищесказаного актуальність використання нечіткої логіки у рамках синтезу систем автоматичного керування розглянутим об'єктом - бункерними вагами цілеспрямовано якщо канал регулювання буде характеризуватись нелінійною характеристикою або параметричною невизначеністю в діапазоні регулювання. Це є особливою проблемою в сфері автоматизації коли необхідно керувати об'єктами, функції яких описуються нелінійними залежностями. При проектуванні систем керування для нелінійних об'єктів зазвичай використовуються такі методи як лінійна апроксимація або кусочно-лінійна апроксимація.

Однак застосування цих методів у реальних технічних пристроях не завжди дозволяє досягнути бажаного ефекту. У цьому випадку для забезпечення збільшення ефективності можна використовувати систему керування з нечіткою логікою («fuzzy logic»).

Таким чином, в умовах наявності істотних невизначеностей у статичних і динамічних характеристиках бункерних ваг як об'єкта керування представляються труднощі в формалізації завдань синтезу регуляторів системи керування. У зв'язку з цим доцільним (актуальним) є застосування регуляторів, заснованих на нечіткій логіці.

3.2 Реалізація в програмному середовищі MATLAB\Simulink моделі каналу регулювання розглянутого об'єкта керування який характеризується нелінійною статичною характеристикою

Актуальності застосування системи керування, побудованої на базі апарата нечіткої логіки, для розглянутого у даній роботі об'єкта керування, необхідно підтвердити, а це головним чином за рахунок переходу до його нелінійної моделі. Таким чином, модель каналу регулювання розглянутого об'єкта керування повинна характеризуватися несуттєво нелінійною статичною характеристикою. Для представлення нелінійної моделі об'єкта керування необхідно до відповідної моделі каналу регулювання додати відповідну нелінійну ланку. Таким чином, нелінійність необхідно реалізувати за допомогою включення блоку Look up Table у відповідну модель каналу регулювання. Структурна схема повної моделі об'єкта керування з додатковим блоком Look up Table, що визначає нелінійність статичної характеристики, представлена на рисунку 3.1. На рисунку 3.1 відображено повну модель об'єкту керування, яка є більш розширеною моделлю, розробка якої представлена в розділі 2 роботи. У блоці Look up Table у табличній формі задається нелінійний зв'язок (залежність) між вхідними змінними, який тягне «викривлення» статичної характеристики моделі каналу регулювання.

В остаточному підсумку в результаті моделювання була отримана статична характеристика моделі каналу регулювання « $u_I - M$ », яка має вигляд, представлений на рисунку 3.2.

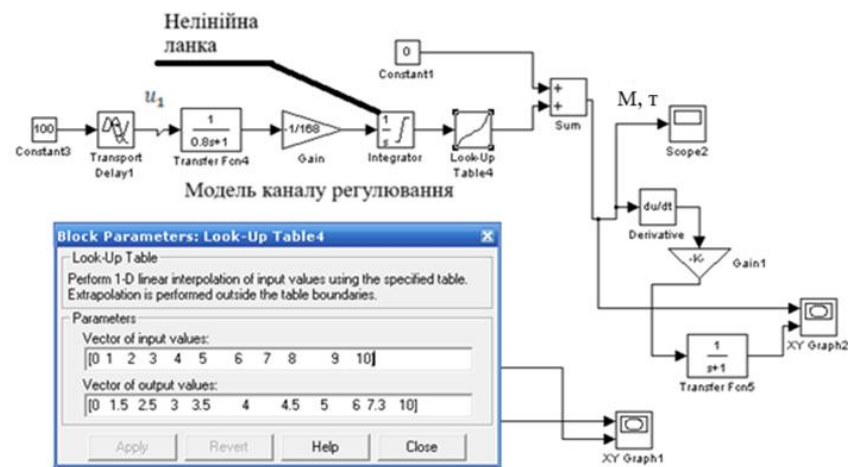


Рис. 3.1 – Структурна схема моделі об'єкта керування, що характеризується нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання

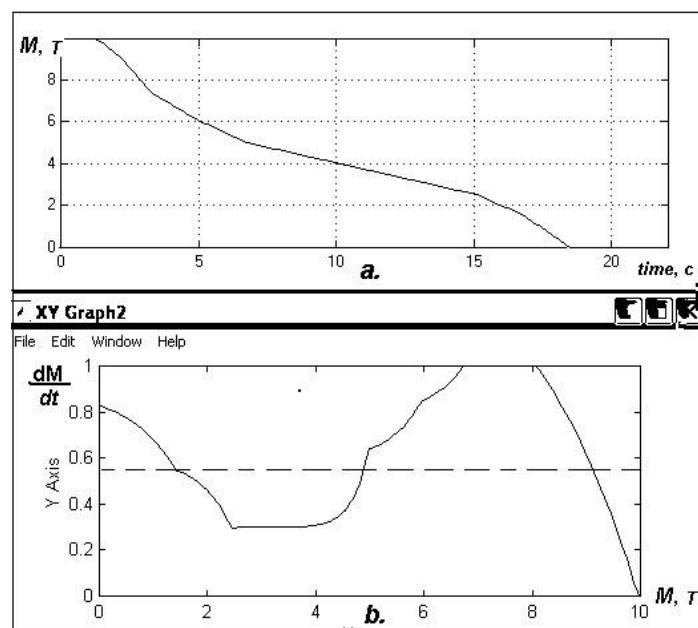


Рис. 3.2 – Нелінійна характеристика моделі каналу регулювання:

- а) – динамічна характеристика при $u=100\%$ x.p.o; б) – залежність швидкості розвантаження dM/dt від маси сировини M , тонн

З рисунку 3.2 видно, що статична характеристика несуттєво нелінійна, це дає можливість виконати синтез САК з традиційними ПІД регуляторами і одержати необхідні показники якості регулювання.

3.3 Параметричний синтез САК з традиційним ПІД регулятором для об'єкта який характеризується нелінійною характеристикою каналу регулювання

У даній роботі був виконаний параметричний синтез САК з традиційним – лінійним ПІД регулятором для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання. Слід зазначити, що нелінійність статичної характеристики була реалізована в моделі, «гладкої» і несуттєвої для одержання стійких перехідних процесів при застосуванні традиційних – лінійних (П, ПІ, ПІД) регуляторів.

Параметри настроювання регуляторів були визначені на основі статичних і динамічних параметрів об'єкта керування в рамках лінійної моделі.

Для реалізації параметричної оптимізації регулятора системи керування в програмному середовищі MATLAB\Simulink 5.2 була розроблена схема моделювання системи керування з автоматичним оптимізатором, що забезпечує пошук оптимальних параметрів регуляторів при мінімізації за наступним модульним критерієм якості роботи системи:

$$J = \int_0^{\infty} |e_1(t)| dt \rightarrow \min$$

$e_1(t)$ – різниця в часі між фактичним значенням регульованої величини і заданим значенням вологості продукту на виході сушарки.

Розроблена схема моделювання системи керування з автоматичним оптимізатором у середовищі MATLAB\Simulink 5.2 представлена на рисунку 3.3.

У результаті параметричної оптимізації за обраним інтегральним показником якості роботи системи та за допомогою відповідного модуля –

додатка MATLAB\Simulink 5.2 були отримані графіки перехідних процесів до і після оптимізації і відповідні параметри настроювання регуляторів.

Початкові параметри настройки регуляторів були визначені наступним чином за відповідними формулами з урахуванням нелінійної характеристики каналу регулювання:

$$K_p = \frac{1,1 \times 168}{1,5} = -123,2 \text{ \%х. р. о/т}$$

$$T_{iz} = 2 \times 1,5 = 3 \text{ с}$$

$$T_{up} = 1 \times 1,5 = 1,5 \text{ с}$$

Відповідно до нормативів ведення технологічних процесів маса М має підтримуватися на рівні 5т з точністю $\pm 0,1$ т. За цим параметром припустимі короткочасні відхилення до $\pm 0,5$ т протягом часу не більше 8 секунд. Всі ці дані відповідають перехідній характеристиці представленої після оптимізації. Відповідні початкові параметри оптимізації були введені у відповідному вікні за стандартними умовами (рис 3.4). Це 100 кроків оптимізації, достатньо великий діапазон пошуку значень оптимізуючи параметрів більш чим на 50%. Параметри канали регулювання були визначені такими як у лінійний моделі отриманою в результаті відповідної ідентифікації.

Необхідно зазначити що оптимізацію проводили поетапно з урахуванням не лінійності характеристики каналу регулювання як за квадратичним так і за модульним інтегральним критерієм якості роботи системи. Але остаточні значення били отримані при тих же умовах що бали при оптимізації відповідної попередньої лінійної системи. На рисунку 3.5 представлена вікно результату оптимізації за модульним критерієм на 98 кроків.

Із графіків перехідних процесів видно, що якість регулювання маси зерна у бункерних вагах, помітно покращилася після оптимізації САК.

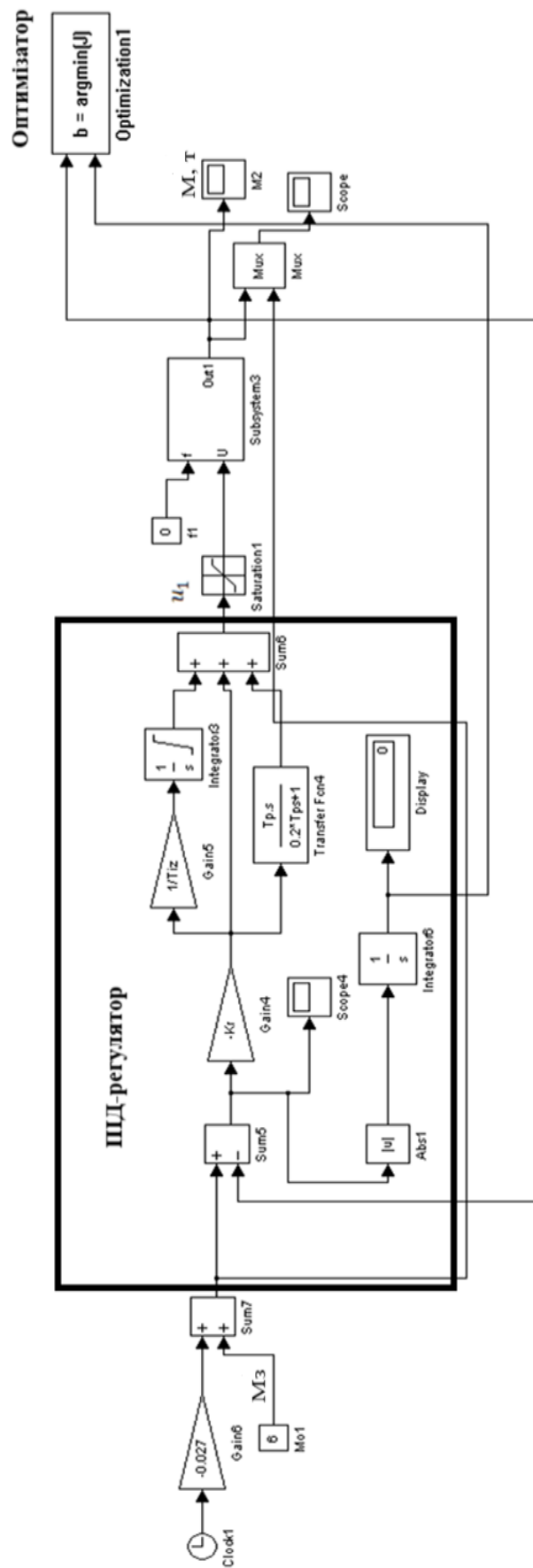


Рис. 3.3 – Структурна схема моделі САК з традиційним ПД-регулятором і параметричним оптимізатором, та структурна схема моделі оптимізованої САР що реалізована засобами MATLAB\Simulink

Однак слід зазначити, що при нелінійній характеристиці каналу регулювання такі покращення можуть мати місце лише при відповідних режимах роботи чи початкових умовах системи керування. Таким чином, оптимальні параметри настроювання в даному випадку можуть бути неоптимальні в іншому випадку, це визначає необхідність застосування нелінійних регуляторів.

Оптимізація

Конкретизація задачі оптимального параметричного синтезу (ОПС)

☐ ОПС за умов параметричної невизначеності ОУ.
☒ ОПС при фіксованих параметрах ОУ.

— Параметри об'єкта управління (ОУ)

Імена параметрів:

Номінальні значення:

Нижні значення діапазонів:

Верхні значення діапазонів:

— Оптимізовані параметри (аргументи)

Імена параметрів:

Початкові наближення:

Нижні обмеження:

Верхні обмеження:

Умови оптимізації (Симплекс метод Нелдера-Міда)

Максимальна кількість кроків процедури оптимізації:

Мінімальне збільшення аргументів:

Мінімально значуще збільшення критерію:

— Візуалізація результатів

Кількість графіків:

Імена змінних відображаються на графіках:

Рис. 3.4 – Вікно вводу початкових параметрів для оптимізації САР з традиційним ПІД регулятором

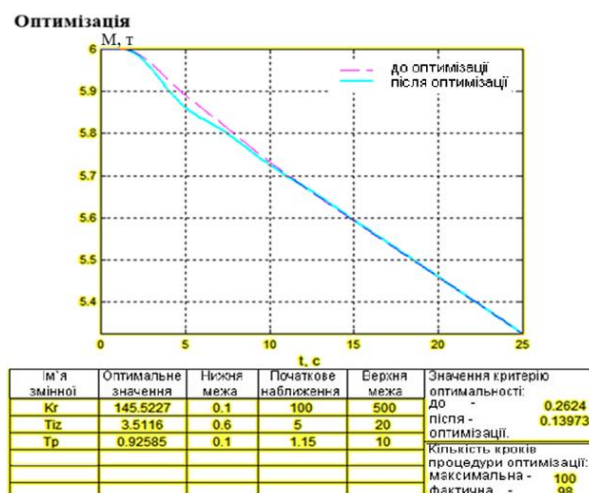


Рис. 3.5. – Вікно результатів параметричної оптимізації значень параметрів ПІД-регулятора САК з каналом регулювання, що характеризуються нелінійною статичною характеристикою

На рисунку 3.5 представлені результати оптимізації та остаточні значення параметрів ПІД-регулятора САР з об'єктом який характеризується нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання.



Рис. 3.6 – Вікно результатів перевірки САР на грубість

Також біла проведена перевірка на грубість САР з каналом регулювання що характеризується нелінійною статичною характеристикою.

Згідно з результатами, що представлені на рисунку 3.6, можна зробити висновок що за грубістю нелінійна система така ж сама як САР з ПІД-регулятором та з каналом регулювання який характеризується лінійною статичною характеристикою.

Згідно з представленими результатами на рисунку 3.6 систему можна вважати не значно грубою бо де які перехідні характеристики відповідають системі що знаходиться на границі стійкості.

3.4 Розробка моделі САК з нечітким регулятором (НР) для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою каналу регулювання

Нечітка логіка в ПД-регуляторах використовується переважно двома шляхами: для побудови самого регулятора і для організації підстроювання коефіцієнтів ПД-регулятора. Оба шляхи можуть використовуватися в ПД-контролері одночасно.

В нашому випадку нечітка логіка використовується для побудови самого регулятора за відомими схемами. Складність опису статичних режимів роботи об'єкта приводить до того, що режими функціонування можуть бути описані з недостатньою точністю, пов'язаною з нечіткими (розмитими) різними експериментальними даними.

Таким чином, у справжній роботі була реалізована модель САК із Fuzzy – нечітким регулятором.

В 1974 році Мамдани [Mamdani] показав можливість застосування ідей нечіткої логіки для побудови системи керування динамічним об'єктом, а роком пізніше вийшла публікація [Mamdani], у якій був описан нечіткий ПІ-регулятор і його застосування для керування парогенератором. З того часу область застосування нечітких регуляторів постійно розширюється, збільшується різноманітність їх структур і виконавчих функцій.

Нечіткий регулятор, що розробляється у даній роботі, являє собою об'єднання на деякій елементній базі трьох блоків фазікерування: фазіфікація, логічного висновку і дефазіфікація.

Структурна схема розробляємої системи керування на базі нечіткого регулятора представлена на рисунку 3.7. Спрощена структурна схема розробляємої системи керування на базі нечіткого регулятора представлена на рисунку 3.8. З погляду структури дана схема регулятора нічим не відрізняється від схем класичних нечітких регуляторів і будується за класичними зразками.

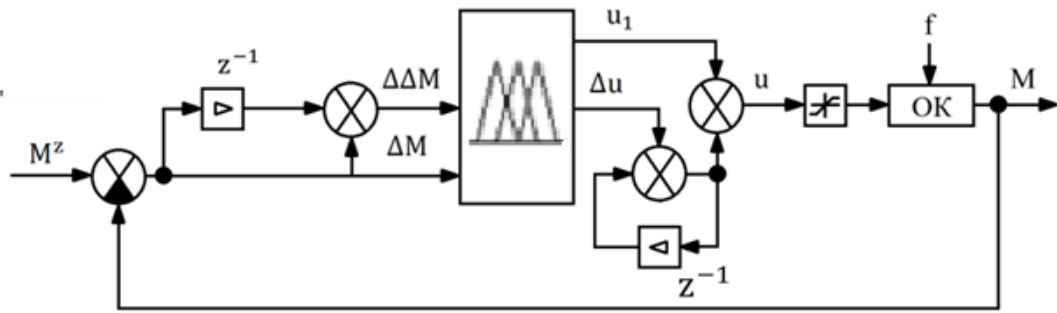


Рис. 3.7 – Структурна схема нечіткого регулятора

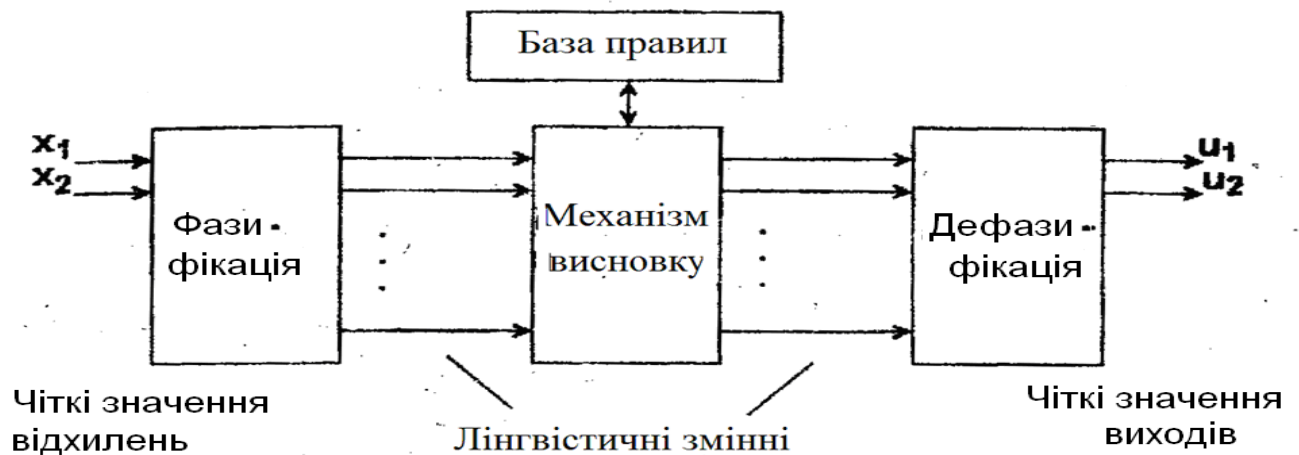


Рис. 3.8 – Спрощена структурна схема нечіткого регулятора

Всі визначені блоки (фазифікація, блок логічного розв'язку, дефазифікація), що представлені на рисунку 3.10, редагуються у відповідному редакторі FIS Editor середовища MATLAB. Для запуску вікна fis-редактора в командному вікні MATLAB Window commander було прописано команду «Fuzzy». Після чого було вибрано алгоритм Sugeno та дві вхідні і дві вихідні змінні.

На рисунку 3.9 зображено вікно налаштування fis-файлу для нечіткого регулятора продукту на виході сушарки з відповідними вхідними та вихідними сигналами.

До теперішнього часу запропоновано кілька алгоритмів нечіткого висновку (алгоритм Мамдані, Цукамото, Ларсена, Сугено та ін.). У даній роботі представляється алгоритм Сугено 0-порядку, так як він являється найпростішим алгоритмом нечіткого виводу.

Формально алгоритм Сугено, запропонований Сугено та Такагі, може бути визначений таким чином. У базі правил використовуються тільки правила нечітких продукцій в формі:

ПРАВИЛО <1>: ЯКЩО $(x \in A_1 \text{ і } y \in B_1)$, ТО, $z_1 = f(x_1, \dots, x_n)$,

ПРАВИЛО <2>: ЯКЩО $(x \in A_2 \text{ і } y \in B_2)$, ТО, $z_2 = f(x_1, \dots, x_n)$,

де x, y - вхідні змінні, A_i, B_i - чисельні значення вхідних параметрів, $z_1 = f(x_1, \dots, x_n)$ - довільна чітка функція.

Згідно з алгоритмом вихідні правила мають функції: $z_1^* = a_1 \cdot x_0 + b_1 \cdot y_0$ та $z_2^* = a_2 \cdot x_0 + b_2 \cdot y_0$. Таким чином, результат дефазифікації обчислюється наступним чином:

$$z_0 = \frac{c_1 \cdot z_1^* + c_2 \cdot z_2^*}{c_1 + c_2}.$$

Якщо як опція f використовується поліном $f(x) = C$, то говорять про алгоритм Сугено 0-порядку. Тоді правила будуть мати наступний вигляд:

ПРАВИЛО <1>: ЯКЩО $(x \in A_1 \text{ і } y \in B_1)$, ТО, $z_1 = C_1$,

ПРАВИЛО <2>: ЯКЩО $(x \in A_2 \text{ і } y \in B_2)$, ТО, $z_2 = C_2$,

де C_1, C_2 – звичайні (чіткі) числа.

Далі алгоритм виконується за наступними етапами:

1. Фазифікація вхідних змінних. На цьому етапі всім відомим конкретним значенням вхідних змінних системи нечіткого виведення ставиться у відповідність нечітку множину, тобто множина значень A_1, A_2, B_1, B_2 .

2. Агрегування передумови в нечітких правилах продукцій. Для знаходження ступеня істинності умов всіх правил нечітких продукцій, як правило, використовується логічна операція min-кон'юнкції. Ті правила, ступінь істинності умов яких відмінна від нуля, вважаються активними і використовуються для подальших розрахунків.

3. Активізація висновків в нечітких правилах продукцій. Для заданого (чіткого) значення аргументу $x = x_0, y = y_0$ знаходяться ступеня істинності для передумов кожного правила. Далі знаходяться значення ступенів істинності всіх висновків правил нечітких продукцій з використанням методу min-активізації:

$$\alpha_1 = \min(\mu_{A_1}(x_0), \mu_{B_1}(y_0)),$$

$$\alpha_2 = \min(\mu_{A_2}(x_0), \mu_{B_2}(y_0)).$$

4. Акумуляція висновків нечітких правил продукцій. Фактично відсутня, оскільки розрахунки здійснюються із звичайними дійсними числами y_j .

5. Дефазифікація вихідних змінних. Використовується модифікований варіант у формі методу центру тяжіння для одноточкових множин:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_i \cdot C_i)}{\sum_{i=1}^n (\alpha_i)}$$

де n – загальна кількість активних правил нечітких продукцій

Розглядаючи структуру керування, можна визначити наступні п'ять правил функціонування НЛР у форматі «if – then», як показано вище у форматі (1):

П1: Якщо похибка регулювання e_I належить нечіткій множині «велика позитивна PE» і приріст похибки регулювання Δe_I належить множині «приблизно нульова Z », то керуюча дія $u_I = w_1$, а приріст керуючої дії $\Delta u_I = w_2$;

П2: Якщо похибка регулювання e_I належить нечіткій множині «велика негативна NE» і приріст похибки регулювання Δe_I належить множині «приблизно нульова Z», то керуюча дія $u_I = -w_1$, а приріст керуючої дії $\Delta u_I = -w_2$;

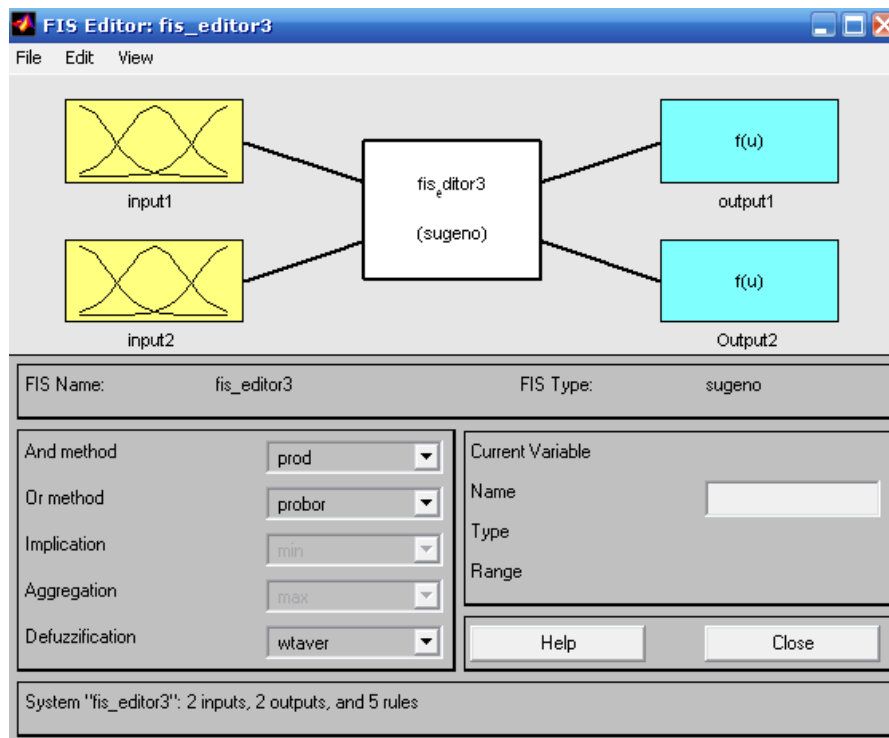


Рис. 3.9 – Вікно редактора нечіткого регулятора з двома входами і двома виходами сигналів

ПЗ: Якщо похибка регулювання e_I належить нечіткій множині «приблизно нульова Z» і приріст похибки регулювання Δe_I належить множині «приблизно нульова Z», то керуюча дія $u_I = 0$, а приріст керуючої дії $\Delta u_I = 0$;

П4: Якщо похибка регулювання e_I належить нечіткій множині «приблизно нульова Z» і приріст похибки регулювання Δe_I належить множині «велика позитивна PE», то керуюча дія $u_I = w1$, а приріст керуючої дії $\Delta u_I = w2$;

П5: Якщо похибка регулювання e_I належить нечіткій множині «приблизно нульова Z» і приріст похибки регулювання Δe_I належить множині «велика негативна NE», то керуюча дія $u_I = -w1$, а приріст керуючої дії $\Delta u_I = -w2$.

Відповідно вище представленим правилам складемо таблицю баз знань для НЛР маси зерна у бункерних вагах.

Як видно з рисунку 3.12, на вхід даного нечіткого регулятора будуть подаватись дві змінні – помилка регулювання (input1) та приріст помилки

регулювання (input2). Для змінної input1 задаємо три трикутні функції приналежності «trimf». Це проста функція приналежності і найбільш часто застосовується.

Трикутна функція приналежності задається наступною аналітичною формулою:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}.$$

$[a, c]$ – діапазон зміни змінної, для справжнього випадку $a = -3$, $c = 3$;

b - найбільш можливе значення змінної

Всі функції приналежності були визначені у відповідному редакторі на базі експертних даних. На рисунку 3.10 зображено вікно налаштування функцій приналежності mf1, mf2, mf3 до нечітких множин похибка регулювання «велика негативна», «приблизно нульова», «велика позитивна» відповідно. Також були визначені функції приналежності mf1, mf2, mf3 до нечітких множин приріст похибки регулювання «великий негативний», «приблизно нульовий» та «великий позитивний», які представлені на рисунку 3.10.

Згідно з таблицею 3.1 бази правил функціонування регулятора, були прописані відповідні правила у вікні редактора правил функціонування нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink. Це вікно з відповідними правилами зображено на рисунку 3.11.

Таблиця 3.1 – Таблиця бази знань для нечіткого логічного регулятора маси зерна у бункерних вагах

$e_1 \quad \Delta e_1$	NE (Велика негативна Δe_1)	Z (приблизно нульова Δe_1)	PE (Велика позитивна Δe_1)
NE	–	$u_1 = 280;$ $\Delta u_1 = 9;$	–
Z	$u_1 = 280;$ $\Delta u_1 = 9;$	$u_1 = 0;$ $\Delta u_1 = 0;$	$u_1 = -280;$ $\Delta u_1 = -9;$
PE	–	$u_1 = -280;$ $\Delta u_1 = -9;$	–

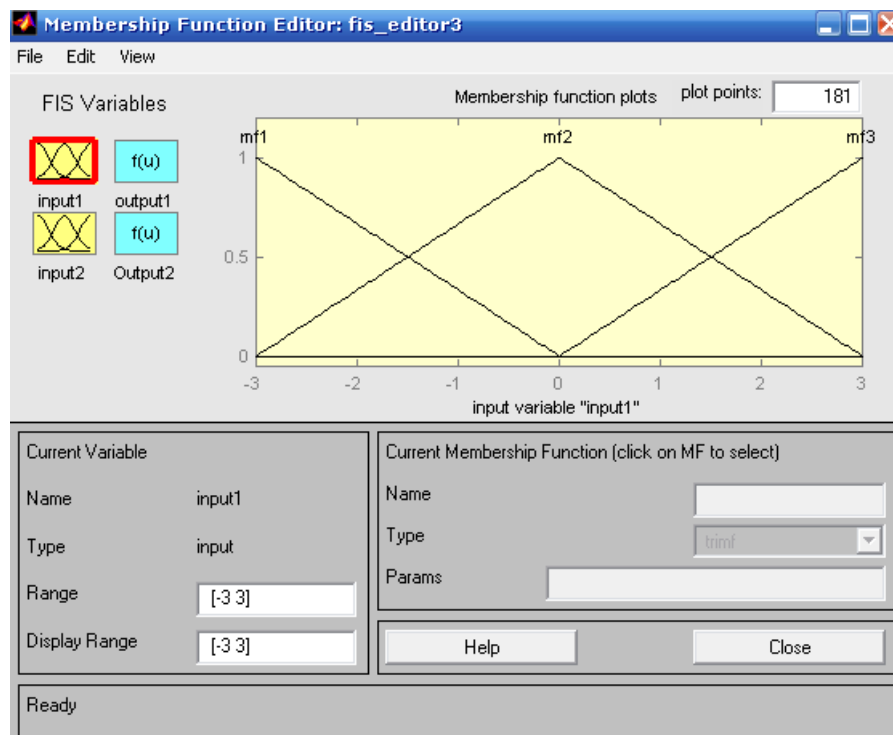


Рис. 3.10 – Вікно формування функцій приналежностей до нечітких безлічей помилка PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

При дефазифікації вихідних змінних використовується модифікований варіант у формі методу центру тяжіння для одноточкових множин згідно з наступною формулою:

$$y_{out} = \frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_i \cdot C_i)}{\sum_{i=1}^n (\alpha_i)}$$

де n – загальна кількість активних правил нечітких продукцій, у нашому випадку – 5 правил;

$\alpha_1 = \min(\mu_{A_1}(x_0), \mu_{B_1}(x_0)), \alpha_2 = \min(\mu_{A_1}(x_0), \mu_{B_2}(x_0))$ – значення ступенів істинності всіх висновків правил нечітких продукцій з використанням методу min-активізації.

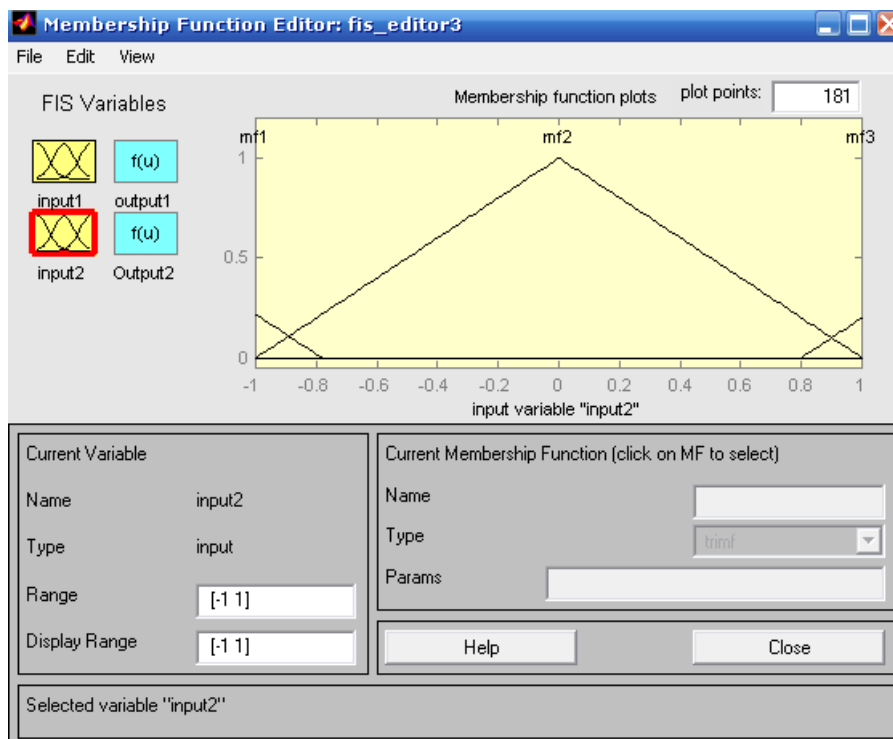


Рис. 3.11 – Вікна формування функцій приналежностей до нечітких безлічей збільшення значення помилки PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

У даному випадку вихідні значення сигналів C_i згідно з алгоритмом Сугено нульового порядку були визначені у вікні реактора, представленого на

рисунку 3.13. Виходами синтезованого нечіткого регулятора визначені зміни «output1» та «output2». Вихід «output1» буде відпрацьовувати інтегральну І-складову регулятора, а «output2» – відповідно П-складову.

Для запуску синтезованого алгоритму перетягнуто на робоче поле створення моделі SIMULINK блок «Fuzzy Logic Controller» зі стандартної бібліотеки. У відкритому вікні «Fuzzy Logic Controller» було записано в запропонованому полі ім'я fis-файлу, а в головному вікні налаштування fis-файлу було вибрано File / Save to Workspace для завантаження у робочій простір середовища MATLAB нечіткого алгоритму керування.

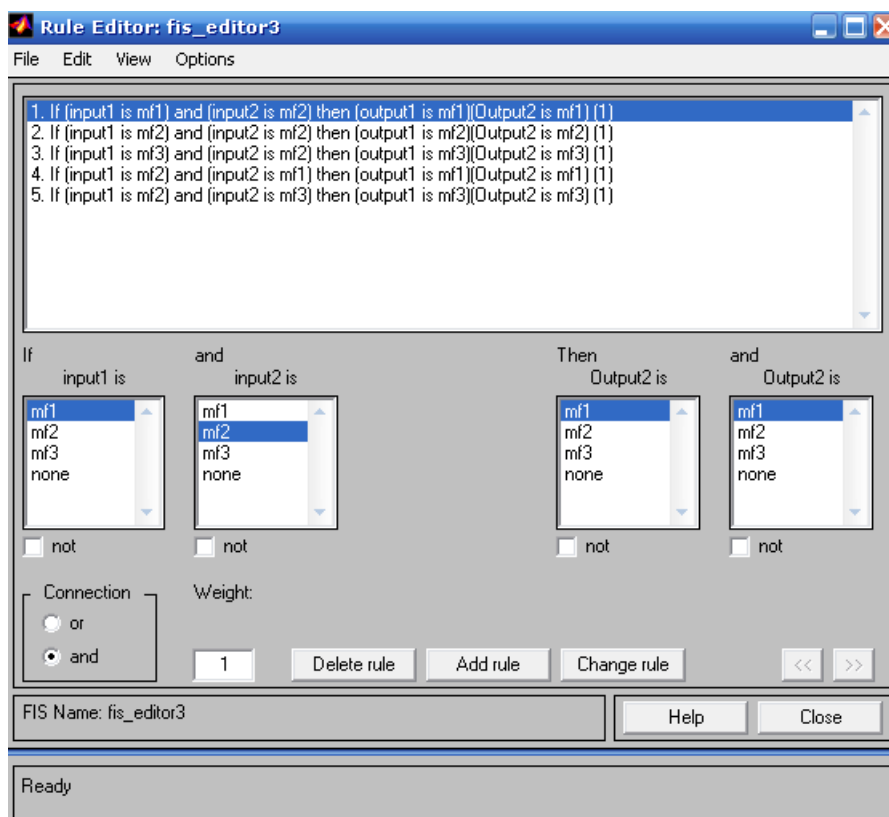


Рис. 3.12 – Вікно редактора правил функціонування нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

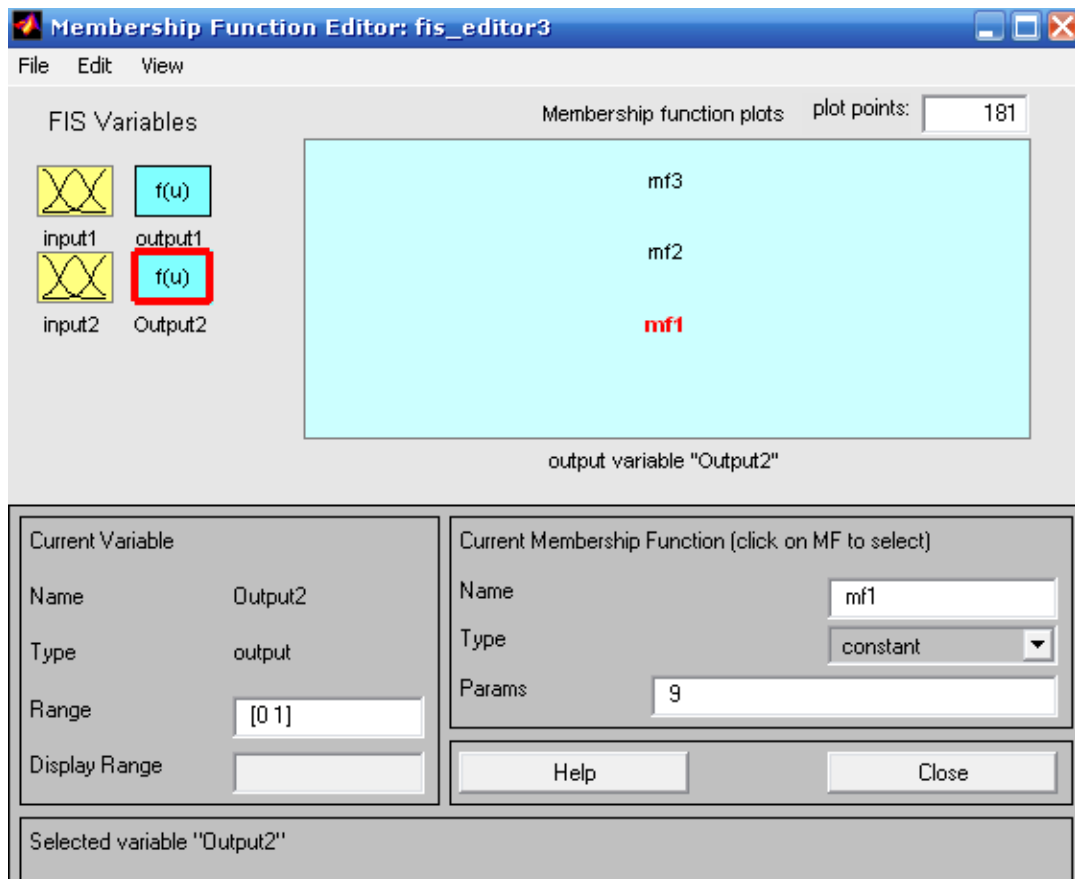


Рис. 3.13 – Вікно редактора вихідних значень нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

У кінцевому випадку була визначена схема моделювання САК з нечітким регулятором, фрагмент якої представлений на рисунку 3.14. З рисунку 3.15 видно, що керуюча дія нечіткого регулятора формується з декілька складових за формулою:

$$u(t) = u_1(t) + (u_2(t - \tau_z) + \Delta u_2)$$

де $u_1(t)$ – управляюча дія П-складової регулятора;

$\Delta u_2 = u_2(t) - u_2(t - \tau_z)$ – приріст управляючої дії від нечіткого регулятора; $u_2(t - \tau_z)$ – управляюча дія з затримкою за часом τ_z .

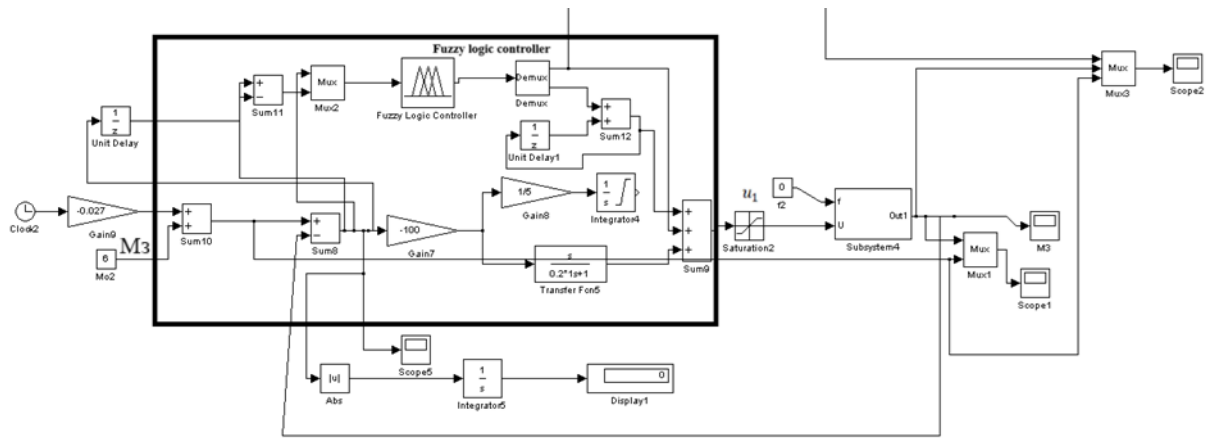


Рис. 3.14 – Фрагмент схеми моделювання САК з нечітким логічним регулятором

Слід зазначити, що при синтезі нечіткого логічного регулятора «Fuzzy Logic Controller» всі функції приналежності к нечітким множинам та логічні правила функціонування визначені на базі експертних даних. А потім скореговані при моделюванні методом «проб і помилок». Також логічні правила функціонування були визначені з урахуванням правил функціонування нечітких регуляторів, представлених у відомих наукових роботах, одних із перших з Fuzzy керування.

3.5 Порівняльний аналіз функціонування САК з традиційним ПІД регулятором і САК з нечітким регулятором

У результаті моделювання САК з нечітким регулятором були отримані графіки перехідних процесів з виходу системи на номінальний режим функціонування і також перехідні процеси при детермінованому впливі, що збурює. Для порівняльного аналізу також були представлені відповідні графіки перехідних процесів у САК з традиційним ПІД-регулятором.

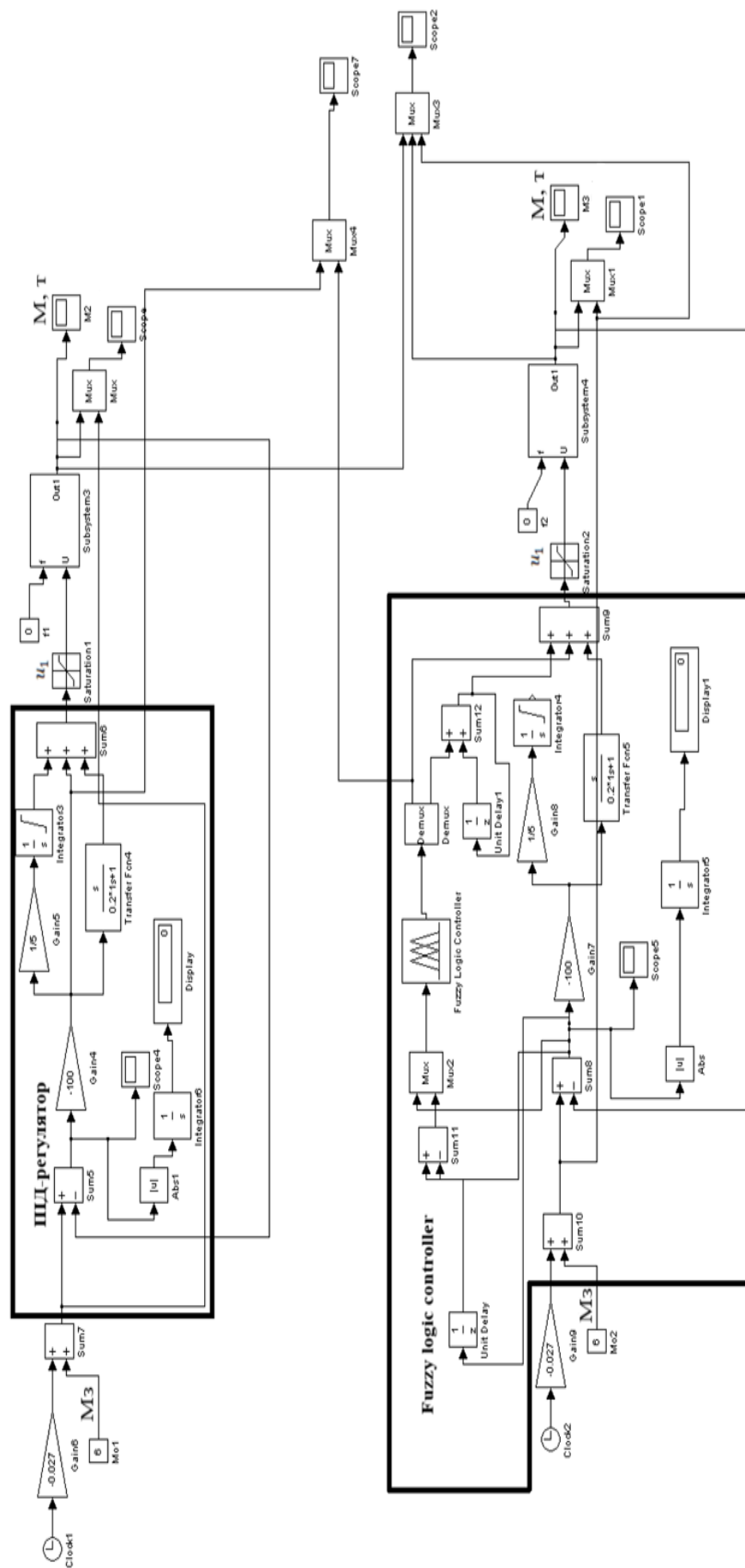


Рис. 3.15 – Структурні схеми моделей САК з ПІД-регулятором і САК з нечітким регулятором для отримання графіків перехідних процесів з метою порівняльного аналізу функціонування різних САК

На рисунку 3.15 представлені відповідні схеми моделювання САР з ПІД регулятором та САР з нечітким регулятором якій відтворює ПІ складову ПІД регулятора. Як можна побачити з рисунку диференційна Д- складова однакова в різних системах керування. Такі системи були представлені паралельно для визначення відповідних перехідних характеристик для порівняльного аналізу за прямими показниками якості регулювання.

Іншому випадку реалізація нечіткого регулятора може бути виконано при умові якщо відомі не вихідні значення регулятора при відповідних похибках регулювання а вихідні функції приналежності значень управляючого впливу.

В даному випадку теж необхідно визначити функції приналежності до нечітких множин маси М «велика» РЕ, «нормальна» Z, та «занадто мала» NE. А далі висновок може бути зроблений згідно з алгоритмом Мамдані.

Алгоритм Мамдані — алгоритм нечіткого логічного виводу по базі знань (базі правил) формується в предметній області у вигляді нечітких предикатних правил виду:

П1: якщо $x \in A_1$, тоді $z \in B_1$,

П2: якщо $x \in A_2$, тоді $z \in B_2$,

.....

Пn: якщо $x \in A_n$, тоді $z \in B_n$,

де x — вхідна змінна(ім'я для відомих значень даних), z — змінна виводу(ім'я для значення даних, яке буде обчислене). A_i та B_i — нечіткі множини, визначені на X та Z відповідно за допомогою функції приналежності та (z) .

У представленій ситуації даних вивід у формі алгоритму Мамдані математично можна представити наступним чином.

1. Введення нечіткості (fuzzification): для заданого(чіткого) значення аргументу $x = x_0$ знаходяться степені істинності для передумов кожного правила $a_i = (x_0)$.

2. Нечіткий вивід: знаходиться рівні відсічення для передумов кожного з правил (з використання правила мінімуму):

$$\alpha_1 = A1(x_0) \wedge B1(y_0)$$

$$\alpha_2 = A2(x_0) \wedge B2(y_0)$$

де через $\wedge$ позначено операцію логічного мінімуму.

Потім знаходяться усічені функції належності:

$$C'_1(z) = (\alpha_1 \wedge C_1(z))$$

$$C'_2(z) = (\alpha_2 \wedge C_2(z))$$

3. Композиція: з використанням операції $\max$ (позначеної як $\vee$) виконується об'єднання знайдених усічених функцій, що приводить до отримання підсумкової нечіткої підмножини для змінної виходу з функцією належності.

$$M(z) = C(z) = C'_1(z) \vee C'_2(z) = (\alpha_1 \wedge C_1(z)) \vee (\alpha_2 \wedge C_2(z))$$

Таким чином, для переходу від Сугено 0-го порядку до алгоритму Мамдані необхідно визначити вихідні функції приналежності $C_1(z)$, $C_2(z)$, $C_3(z)$ замість відповідних значень W_2 , $-W_2$, та C_1 , C_2 .

На рисунках 3.16 та 3.17 представлені такі відповідні вихідні функції приналежності к множинам – «приріст управляючого впливі» великій (PE), «приріст управляючого впливі» приблизно нульовий (Z), «приріст управляючого впливі» від'ємний (NE).

Приведення до чіткості (дефазифікації). для моделі Мамдані використовують дефазифікація центроїдним методом, коли чітке значення вихідної змінної визначається як центр ваги для кривої результуючої функції приналежності $\mu_{\Sigma}(z)$.

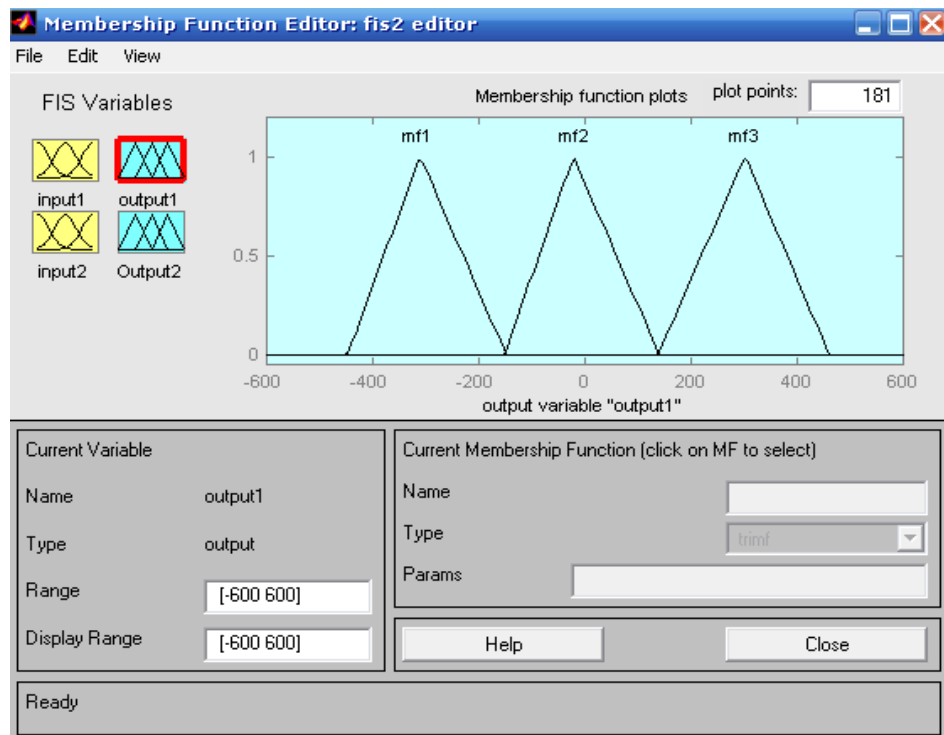


Рис. 3.16 – Вікна формування вихідних функцій приналежностей до нечітких безлічей – «збільшення управляючого впливу PE, Z, NE» для алгоритму

Мамдані

Для виконання чисельних розрахунків на етапі дефазифікації для алгоритму Мамадані використана формула центру ваги (тяжіння) (англ. *Centre of Gravity, CoG*) або центроїд площі що розраховується за формулою:

$$y = \frac{\int_{min}^{max} x \cdot \mu(x) \cdot dx}{\int_{min}^{max} \mu(x) \cdot dx},$$

де y – результат дефазифікації; x – змінна, що відповідає вихідній лінгвістичній змінній w_i ; $\mu(x)$ – функція приналежності нечіткої множини, що відповідає вихідній змінній w після етапу акумуляції; min, max – ліва та права точки інтервалу носія нечіткої множини вихідної змінної w .

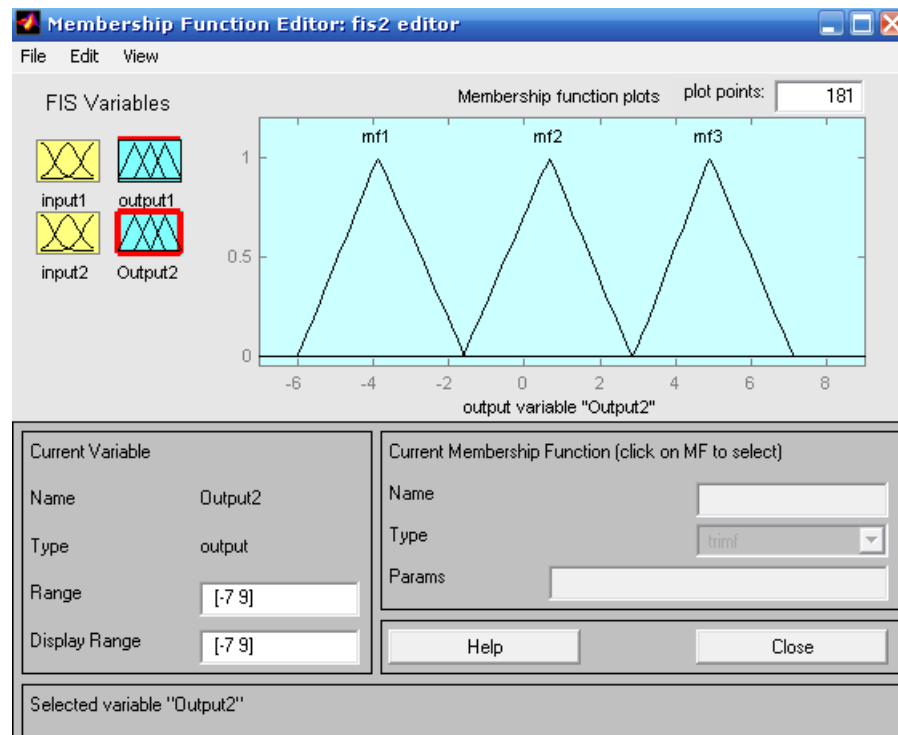


Рис. 3.17 – Вікна формування вихідних функцій приналежностей до нечітких безлічей – «збільшення управляючого впливу PE, Z, NE» для алгоритму Мамдані

При дефазифікації методом центру тяжіння звичайне (чітке) значення вихідної змінної дорівнює абсцисі центру ваги площі, обмеженою графіком кривої функції приналежності відповідної вихідної змінної.

Таким чином, на рисунку 3.18 представлені графіки перехідних процесів при детермінованому збурюванні.

Згідно з графіками перехідних процесів можна зробити висновок що завдяки використанню нечіткого регулятора в системі не дало покращати якість регулювання маси зерна у бункерних вагах.

Таким чином робота далі буде пов'язана з перетворенням системи з нечітким регулятором в нейромережеву систему керування для подальшої процедури оптимізації.

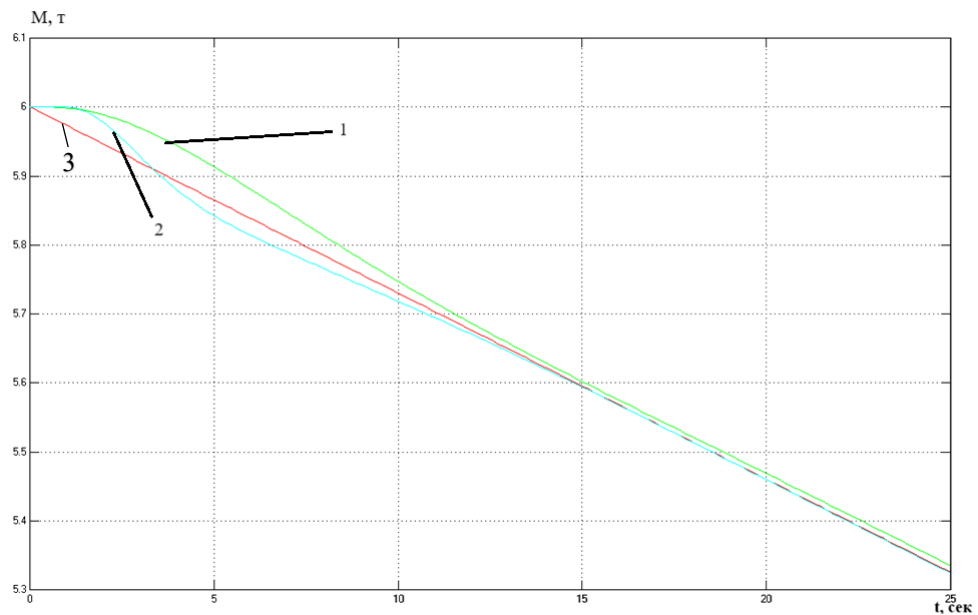


Рис. 3.18 – Графіки переходних процесів що отримані в результаті моделювання різних САК, графіки 1 – перехідний процес у САК з нечітким регулятором з висновком Сугено -0; графік 2 – перехідний процес у САК з ПД регулятором; 3 – задане значення маси

3.6 Обґрунтування актуальності застосування неймережевих алгоритмів керування

В історії розвитку теорії автоматичного керування чітко виділяються три етапи. Першим був етап класичної детермінованої теорії автоматичного регулювання, що охопив період часу з кінця XIX по 40-і роки XX століття.

У цей період основними завданнями керування було забезпечення стійкості і відповідної якості переходних процесів.

Другий етап теорії керування почався в 40— 50-х роках XX-го століття і тривав приблизно до середини 70-х років. Це — етап класичної стохастичної теорії автоматичного регулювання. Він характеризується новою постановкою основного завдання теорії керування: врахувати випадкові збурювання, що діють на систему, і забезпечити якісну роботу в умовах постійно діючих перешкод.

Наприкінці ХХ-го століття в розвитку теорії автоматичного керування почався новий етап, пов'язаний з адаптивною постановкою основного завдання керування. Його особливість полягає у відсутності споконвічних знань про математичну модель об'єкта керування, будь то диференціальні рівняння або щільності ймовірностей випадкових зовнішніх впливів.

Об'єкт — це чорний ящик, що зазнає невідомі випадкові впливи. Нам доступні тільки його входи і виходи. Ціль системи керування (СК) полягає в тому, щоб уже в процесі функціонування визначити закон регулювання, що забезпечує оптимальну поведінку об'єкта.

Для розв'язання цього завдання на додаток до основного контуру до системи керування вводиться контур адаптації (Рис 3.19).

З самого початку третього етапу величезна увага приділялася адаптивному керуванню лінійними стаціонарними об'єктами з невідомими параметрами (наприклад, широко використовуються методики, що опираються на побудову спостерігачів).

У рамках цього підходу в 80-х роках почалося використання ШНМ для розв'язання завдань керування. Отримані результати показали, що ШНМ являють собою не просто нову методику в теорії автоматичного керування, а цілу парадигму. Для нового напрямку в теорії керування була введена окрема назва — нейрокерування (neurocontrol).



Рис. 3.19 – Загальна схема адаптивної системи керування

Штучні нейронні мережі (ШНМ) у цей час знаходять широке застосування в самих різних предметних областях. Одним з важливих напрямків використання штучних нейронних мереж є нейрокерування в системах автоматичного керування різних типів.

Нейрокерування — це окремий випадок інтелектуального керування, при якому у якості інструмента для розв'язку завдань керування застосовуються штучні нейронні мережі.

Потенційними областями застосування штучних нейронних мереж є ті, де людський інтелект малоефективний, а традиційні обчислення трудомісткі або фізично неадекватні. Актуальність застосування нейронних мереж багаторазово зростає, коли з'являється необхідність розв'язку погано формалізованих задач. Основні області застосування нейронних мереж: автоматизація процесу класифікації, автоматизація прогнозування, автоматизація процесу розпізнавання, автоматизація процесу прийняття розв'язків; керування, кодування і декодування інформації; апроксимація залежностей і ін.

Штучна нейронна мережа як нейрорегулятор здійснює нелінійне перетворення вхідного сигналу і формування управляючого впливу. При цьому регулятор може мати велику кількість оптимізованих параметрів (коефіцієнтів міжнейронних зв'язків), що дає можливість оптимізувати його практично під будь-який об'єкт з нелінійною статичною характеристикою.

У даній роботі нейрона мережа – це математична модель з параметрами, що оптимізуються, яка буде виконувати функції розробленого раніше нечіткого логічного регулятора.

3.7 Розробка моделі САК з нелінійними перетворюючими на основі штучних нейронних мереж

Використання ШНМ дозволяє вирішувати завдання керування нелінійним об'єктом шляхом створення адаптивної системи керування (СК) з

нейроконтролером (НК), що навчається. Структурна схема САК з регулятором на основі нейронної мережі наведена на рис. 3.20

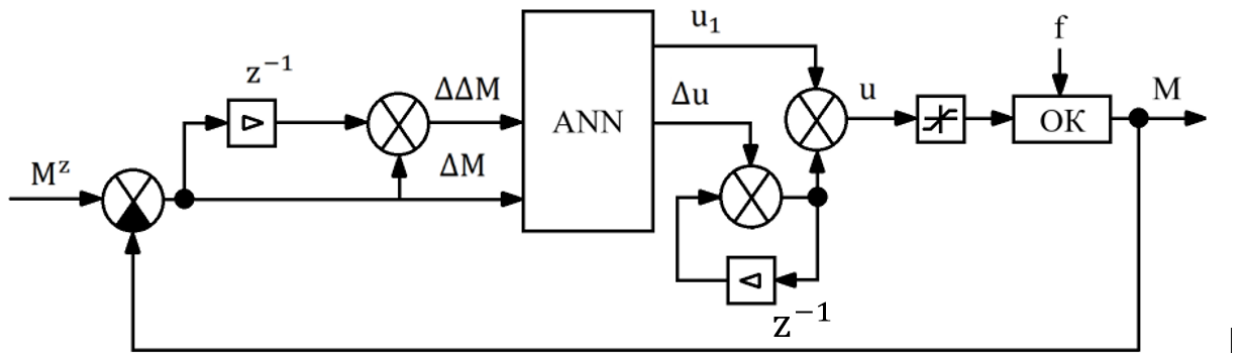


Рис. 3.20 – Схема системи керування з регулятором на основі нейронної мережі

Тут під навчанням мається на увазі процес вироблення в СУ бажаної реакції на зовнішні сигнали шляхом багаторазових впливів на систему зовнішнім корегуванням. Зовнішнє коректування здійснюється “вчителем”, якому відома бажана реакція СУ на певні впливи. Таким чином, при навчанні “вчитель” повідомляє системі додаткову інформацію про те, вірна або невірна її реакція (Рис 3.21)

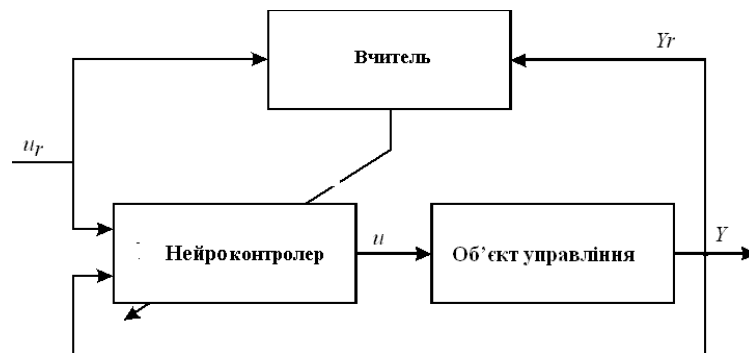


Рис 3.21 – Загальна схема системи керування з нейроконтролером, що навчається

При адаптації навчання використовується для одержання інформації про стан і характеристики СУ, необхідної для оптимального керування в умовах невизначеності. По суті, адаптацію можна ототожнити з оптимізацією в умовах недостатньої апріорної інформації.

Існує безліч підходів до застосування ШНМ у якості НК. Наприклад, пропонується використовувати ШНМ як нелінійні підсилювачі при інтегральній, диференціальній та пропорційній частинах ПД-регулятора (рис 3.22).

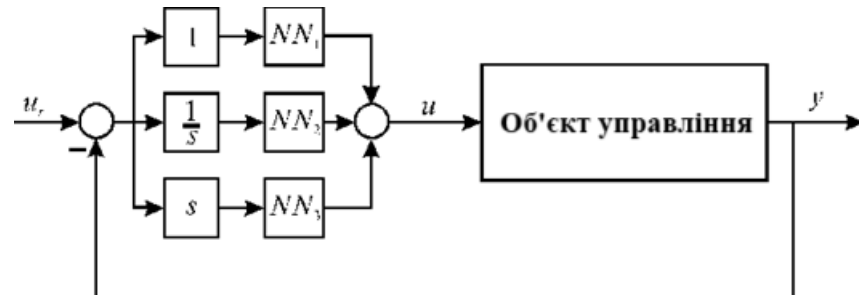


Рис. 3.22 – Система керування з комбінованим ПД-нейрорегулятором

Математична модель, що застосовується у якості нейронелементу у нейромереживому алгоритмі керування, аналогічна відомим найбільш розповсюдженим моделям, які схожі з формальною моделлю нейрона Маккаллоха – Питса. У даній моделі сигнали, що поступили на входи нейроелементу, множаться на свої ваги. Сигнал першого входу x_1 множиться на відповідну вагу w_1 .

У підсумку отримуємо $x_1 w_1$. І так до n-ого входу. У підсумку на останньому вході отримуємо $x_n w_n$. Потім всі множення передаються в суматор. Уже виходячи з його назви можна зрозуміти, що він робить. Він просто підсумовує всі вхідні сигнали, помножені на відповідні ваги:

$$x_1 w_1 + x_2 w_2 + \dots + x_n w_n = \sum_{i=1}^n x_i w_i$$

Просто так подавати виважену суму на вихід досить безглуздо. Нейроелемент повинен якось обробити її і сформувати адекватний вихідний сигнал. Саме для цих цілей і використовують функцію активації. Вона перетворює зважену суму в якесь число, яке і є виходом нейрона.

Графічне представлення моделі нейроелемента з графічним представленням різних функцій активації що диференцовані відображено на

рисунку 3.23. Таки нейронелементи будуть складати нейронні мережі які відтворюють нелінійне перетворення в різних складових регулятора як показано на рисунку 3.20.

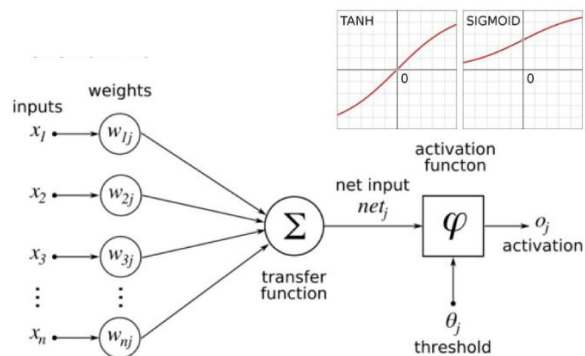


Рис. 3.23 – Структурна схема моделі нейроелемента нейронного регулятора

В якості нелінійних перетворювачів будимо використовувати багат шарові нейронні мережі з відповідними функціями активації. Відомо, що одношарова нейронна мережа має обмежені можливості.

Багат шарова чотирьох-шарова вже надлишкова для рішення різних задач. В нашому випадку будемо використовувати багат шарову нейронну мережу у якості нелінійного перетворювача.

Багат шарові нейронні мережі це більш складні мережі.. Такі мережі, крім вхідного і вихідного шарів нейронів, характеризуються ще і прихованим шаром (шарами).

Зрозуміти їх розташування просто - ці шари знаходяться між вхідним і вихідним шарами.

Але такі багат шарові нейрони мережі мають достатньо поширені відповідні розроблені методи тренування та визначення коефіцієнтів міжнейронних з'єднань.

Один із відомих та достатньо поширених методів це алгоритм зворотного поширення помилки який присутній в програмній можливості середовища MATLAB 5.2. За допомогою цього метода можливо налаштувати визначену нейронну мережу за відповідними командами в вікні Command Window середовища MATLAB.

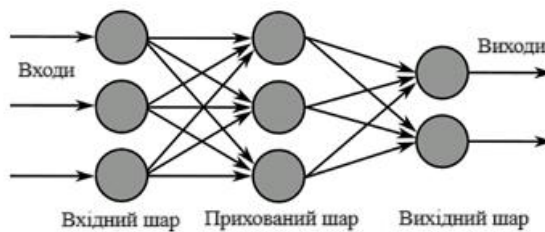


Рис. 3.24 – Багатошарова нейронна мережа яка може використовуватись для нелінійного перетворення сигналів в алгоритмі керування

Для забезпечення роботи алгоритму зворотного поширення помилки необхідно мережі поперемінно у випадковому порядку пред'являються всі тренувальні образи, щоб мережа, образно говорячи, не забувала одні в міру запам'ятовування інших.

Для цього в командному вікні MATLAB представляється тренувальний набір вхідних та вихідних значень нейтронної мережі у вигляді векторів P та T . У векторі P задається діапазон зміни вхідних сигналів в діапазоні зміни похибки регулювання в нашому випадку від -3 до 3.

А у векторі T задається діапазон зміни вихідних сигналів. Так як функція активації обмежує сигнал в діапазоні від -1 до 1 то значення вектора T будуть відповідно від -0,28 до 0,3.

Відповідна програма для відтворення багатошарової нейромережі представлена на рисунку 3.23.

В перших двох рядках представлені вектора P та T . у третьому рядку представлена команда для визначення нейтронної мережі в діапазоні вхідних сигналів від -3 до 3 з двома нейронами в першому шарі та одному нейроні у другому шарі (`newff([-3 3],[2 1])`). В якості функцій активацій вибраний гіперболічний тангенс (сігмоїд) як на першому шарі нейромережі та і на другому (`{'tansig','tansig'}`).

На четвертому рядку програми вказано 100 кроків навчання, в середньому для такої невеликої нейтронної мережі це достатня кількість кроків.

А потім задається команда $net=train(net, P, T)$ для тренування штучної нейронної мережі за відповідним алгоритмом навчання на 100 кроків.

Після навчання необхідно виконати тестування визначеної нейронної мережі.

```
p=[-3 -2 -1 0 1 2 3];
t=[0.28 0.1867 0.093 0 -0.1 -0.2 -0.3];
net=newff([-3 3], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
net.trainParam.epochs=100;
net=train(net, p, t);
a=sim(net, p)
gensim(net)
TRAINLM, Epoch 0/100, MSE 0.8161/0, Gradient 3.03337/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/100, MSE 2.0186e-007/0, Gradient 0.000131307/1e-
010
TRAINLM, Epoch 50/100, MSE 1.8051e-007/0, Gradient 7.48457e-005/1e-
010
TRAINLM, Epoch 75/100, MSE 1.5776e-007/0, Gradient 1.47847e-005/1e-
010
TRAINLM, Epoch 100/100, MSE 1.39693e-007/0, Gradient
0.000229195/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.
a =
    0.2800    0.1867    0.0932   -0.0005   -0.0993   -0.2004   -0.2999
```

```

MATLAB Command Window
File Edit Window Help

To get started, type one of these: helpwin, helpdesk, or demo.
For product information, type tour or visit www.mathworks.com.

>> p=[-3 -2 -1 0 1 2 3];
t=[0.28 0.1867 0.093 0 -0.1 -0.2 -0.3];
net=newff([-3 3], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
net.trainParam.epochs=100;
net=train(net, p, t);
a=sim(net, p)
gensim(net)

TRAINLM, Epoch 0/100, MSE 0.708542/0, Gradient 2.60022/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/100, MSE 0.000192375/0, Gradient 0.00443488/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/100, MSE 5.79625e-006/0, Gradient 0.000290294/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/100, MSE 3.74106e-007/0, Gradient 0.00152852/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/100, MSE 3.55758e-007/0, Gradient 6.68262e-005/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

a =

    0.2801    0.1863    0.0940   -0.0011   -0.0995   -0.2000   -0.3001

```

Рис. 3.25 – Виконавчий код для генерації нейромережі, яка буде відтворювати нелінійне перетворення сигналів в алгоритмі керування

Тестування нейтронної мережі виконується при команді $a = \text{sim}(\text{net}, P)$, після цієї команди виводяться фактичні вихідні сигнали згідно з вхідним вектором P . Фактичні вигідні сигнали можна порівняти з заданими сигналами що представлені у векторі T .

Згідно з представленою програмою фактичні значення вихідних сигналів непомітно відрізняюся від заданих у векторі T . Точність навчання також представляється на відповідному графіку на рисунку 3.26, де показано зменшення та стабілізацію похибки навчання за 100 кроків.

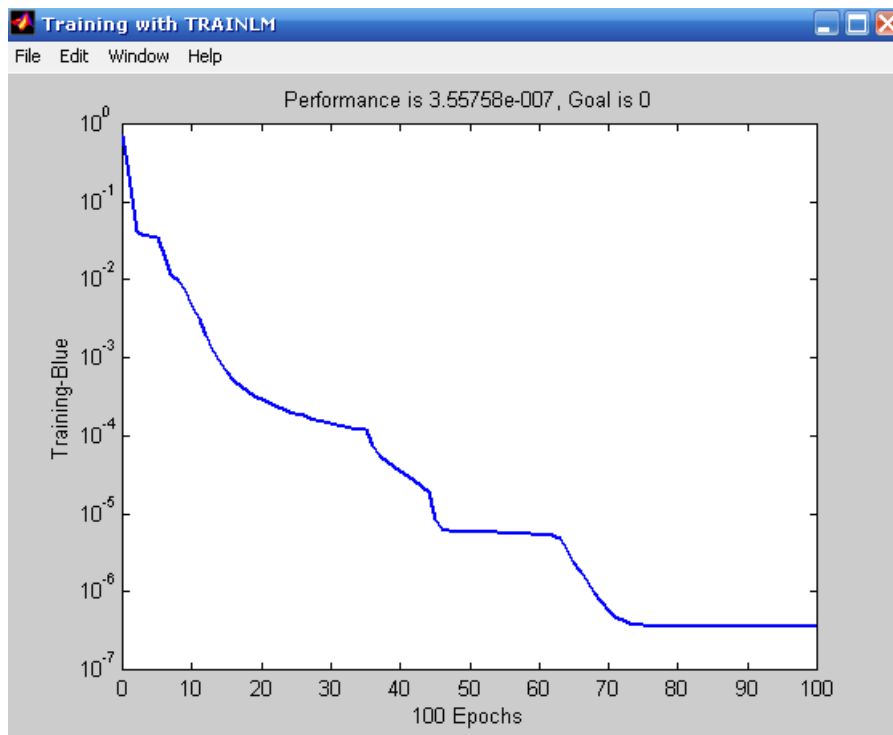


Рис. 3.26 – Характеристика точності навчання нейромережі яка буде відтворювати нелінійне перетворення сигналів в алгоритмі керування

Остання команда яка вводиться для відтворення нейронної мережі в середовище Simulink це команда gensim(net). В результаті виконання цієї команди мережі з'являється нейронна мережа як показано на рисунку 3.27.

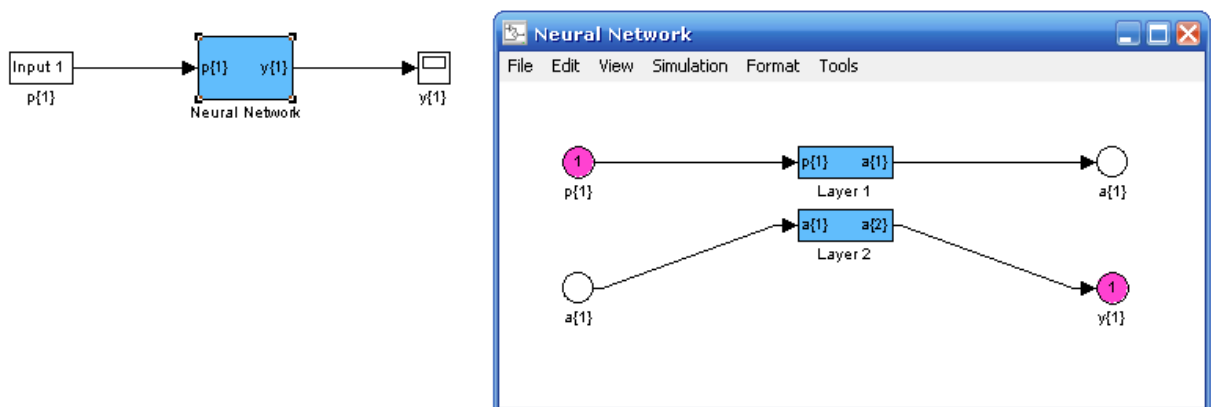


Рис. 3.27 – Відтворена нейронна мережа в середовище Simulink після виконання відповідної програми

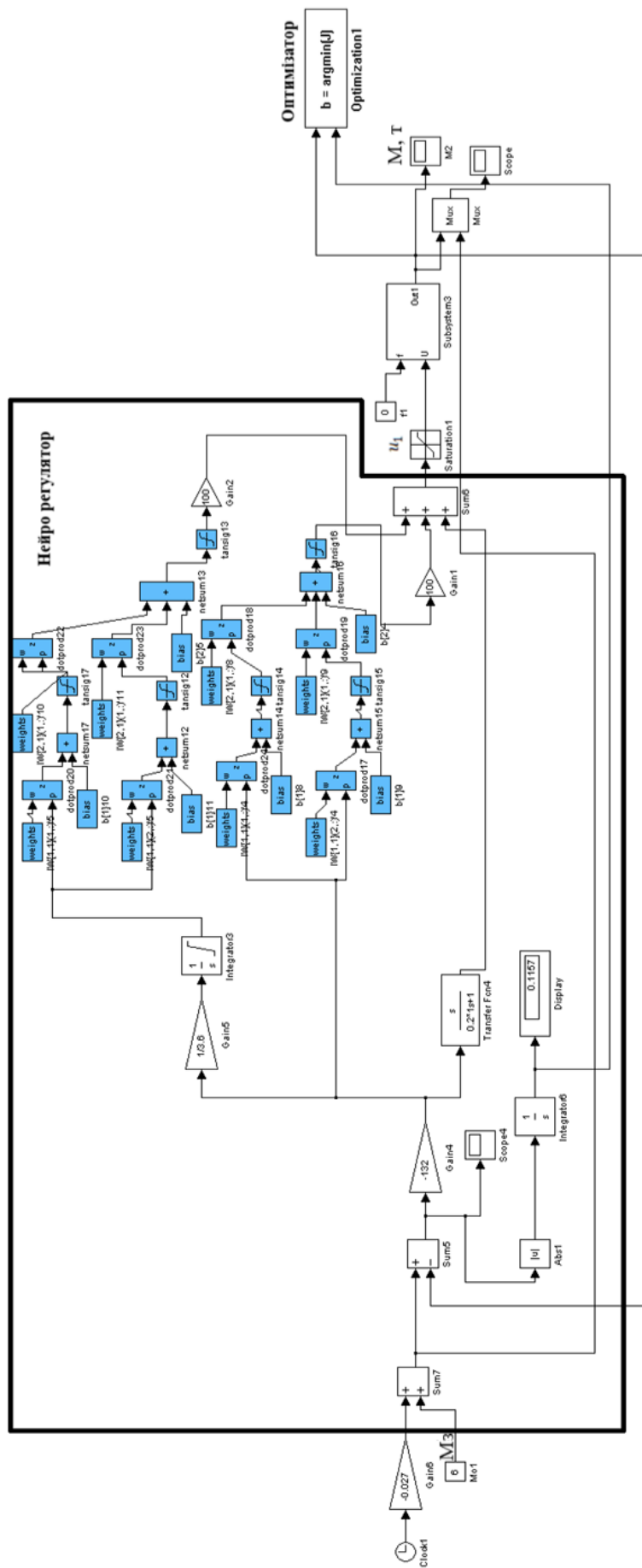


Рис. 3.28 – Структурна схема моделі САК з комбінованим регулятором і параметричним оптимізатором, що реалізована засобами MATLAB\Simulink для визначення оптимальних параметрів системи керування за умови нелінійності статичної характеристики каналу регулювання

Згідно з рисунком 3.27 нейронна мережа складається з двох шарів layer 1 , layer 2 які будить синтезовані в системі регулювання. Для налаштування таких нелінійних перетворювачів необхідно виконати оптимізацію САР за відповідним критерієм якості регулювання. В роботі була синтезована модель системи автоматичного керування з гібридним ПД регулятором та з нелінійними перетворювачами структурна схема якої представлена на рисунку 3.28. Оптимізація виконувалась при тих самих умов що і система зі стандартним ПД регулятором. На рисунку 3.29 представлена вікно початкових параметрів оптимізації САР з гібридним регулятором де показані основні параметри каналу регулювання та параметри налаштувань нелінійних перетворювачів. Значення параметрів складових ПД регулятора були визначені на етапі оптимізації стандартного ПД регулятора і при налаштуванні нелінійних перетворювачів вже не оптимізувались.

Оптимізація

Конкретизація задачі оптимального параметричного синтезу (ОПС)

☐ ОПС за умов параметричної невизначеності ОУ.
☒ ОПС при фіксованих параметрах ОУ.

—Параметри об'єкта управління (09)

Імена параметрів:

Номінальні значення:

Нижні значення діапазонів:

Верхні значення діапазонів:

—Оптимізовані параметри (аргументи)

Імена параметрів:

Початкові наближення:

Нижні обмеження:

Верхні обмеження:

Умови оптимізації (Симплекс метод Нелдера-Міда)

Максимальна кількість кроків процедури оптимізації:

Мінімальне збільшення аргументів:

Мінімально значуще збільшення критерію:

—Візуалізація результатів

Кількість графіків:

Імена змінних відображаються на графіках:

Рис. 3.29 – Вікно вводу початкових параметрів для оптимізації САР з гібридним регулятором

Результати оптимізації представлені на рисунку 3.30. Як видно з рисунку значення критерію якості роботи системи не значно зменшилось, це свідчить про те що якість функціонування САР з гібридним регулятором мало чим відрізняється від САР зі стандартним ПІД регулятором. Такий недолік можливо усунути якщо виконати оптимізацію параметрів нелінійних перетворювачів за всіма коефіцієнтами міжнейронних зв'язків замість тільки коефіцієнтів першого шару.

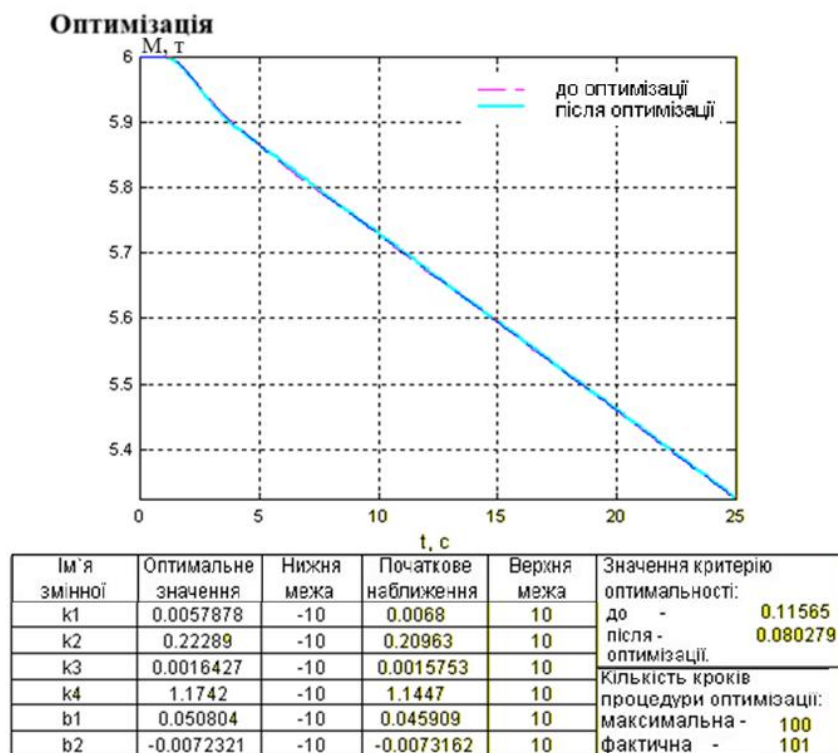


Рис. 3.30 – Вікно результатів параметричної оптимізації значень параметрів комбінованого регулятора САК з каналом регулювання, що характеризується нелінійною статичною характеристикою

В кінцевому випадку для порівняльного аналізу в результаті моделювання були отримані в одних осях перехідні характеристики в САР зі стандартним ПІД регулятором, в САР з нечітким регулятором та в САР з комбінованим регулятором. Ці характеристики представлені на рисунку 3.31.

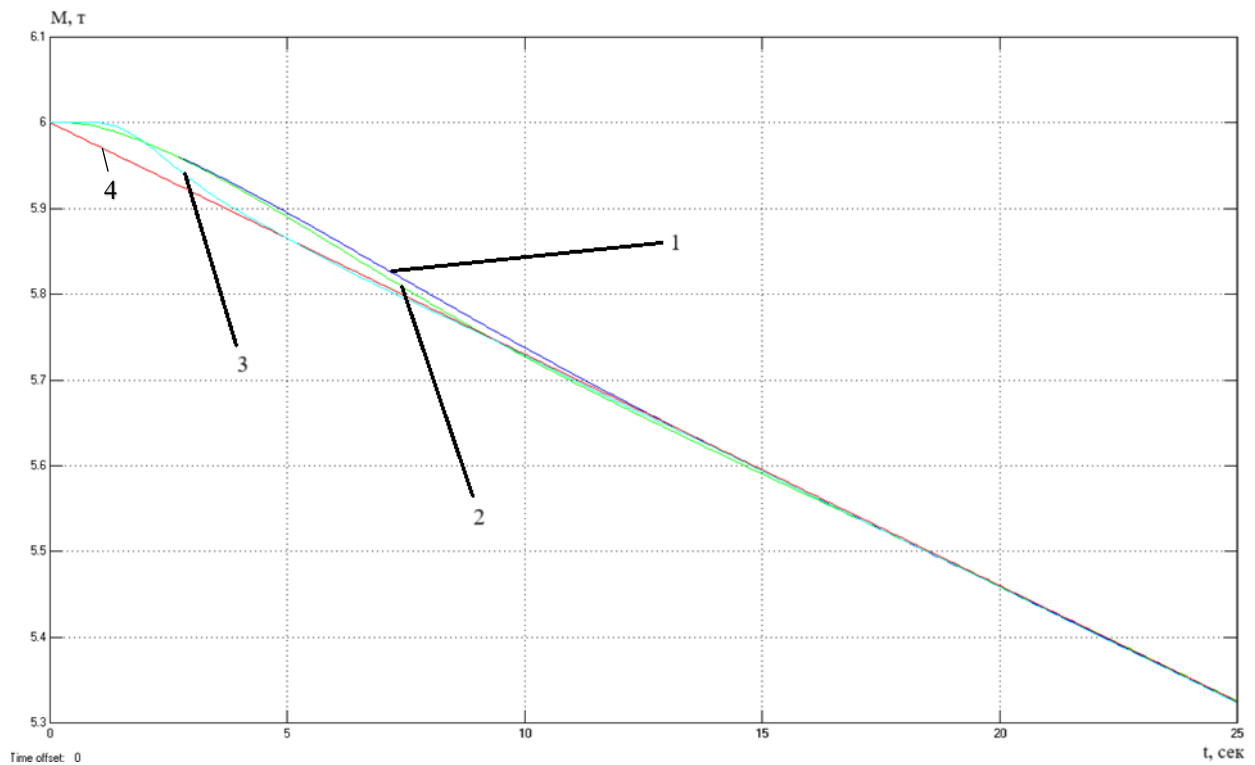


Рис. 3.31 – Графіки перехідних процесів, отримані в результаті моделювання різних САК, графік 1 – перехідний процес в САК з традиційним ПД-регулятором; графік 2 – перехідний процес у САК з нечітким регулятором; графік 3 – перехідний процес у САК з комбінованим регулятором, побудованим на базі штучних нейронних мереж; 4 – задане значення маси

3.7 Синтез моделі САК з нейрорегулятором як з альтернативним варіантом алгоритма керування

Нейрорегулятор у нашому випадку – це штучна нейронна мережа, що характеризується нелінійними характеристиками.

Завдяки цьому застосування нейрорегулятора на базі нейронної мережі дозволить досягти більш високих результатів в управлінні. Нейронна мережа – це послідовність нейронів (нейронелементів), з'єднаних між собою синапсами.

Структура нейронної мережі прийшла в світ програмування прямо з біології. Найбільш поширена структура – багатошарова, застосовується в якості регуляторів нейромережевих алгоритмів керування.

У зв'язку з тим, що нечіткій регулятора визначає приріст управляючої дія як позитивне значення, так і негативне значення, то при синтезі нейронрегулятора необхідно вибрати функції активації нейронів, які приймають значення від -1 до 1. В нашому випадку буде використано гіперболічну тангенціальну функцію (*tansig*). Така функція дозволяє отримати на виході значення різних знаків (наприклад, від -1 до 1), що може бути необхідним в системі керування. Графічне представлення функції відображено на рисунку 3.32.

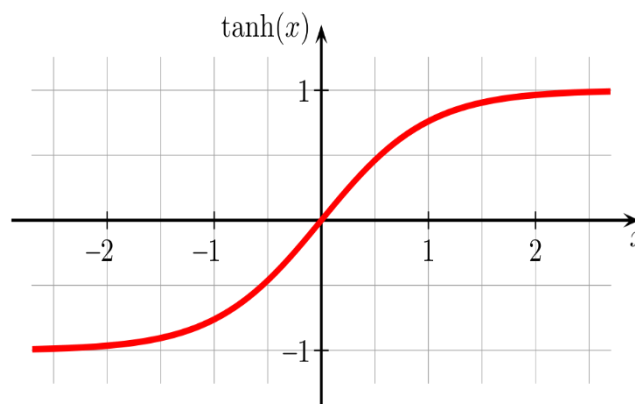


Рис. 3.32 – Графічне представлення функції активації штучного нейрона, що застосовується у нейрорегуляторі

Аналітично функція записується у наступному вигляді:

$$f(net) = \frac{2}{1 + \exp(-\alpha \cdot net)} - 1, \text{ де } net - \text{вхідний аргумент}$$

В одній з перших робіт з нейрокерування представляється дискретна СУ із НК, що одержує на вхід сигнал керування системою $u_r(k)$ і затримані в кілька разів сигнали з виходу об'єкта керування.

У загальному випадку НК такого типу може одержувати і затримані сигнали зі свого виходу (рис 3.33). Таким чином, він формує керуючий вплив за наступним законом:

$$\mathbf{u}(k) = NN(\mathbf{y}(k), \mathbf{y}(k-1), \dots, \mathbf{y}(k-l_1), \mathbf{u}(k-1), \mathbf{u}(k-2), \dots, \mathbf{u}(k-l_2), \mathbf{u}_r(k)), \quad (5)$$

де l_1 і l_2 — глибини затримок зворотних зв'язків за виходом і входом об'єкта керування відповідно.

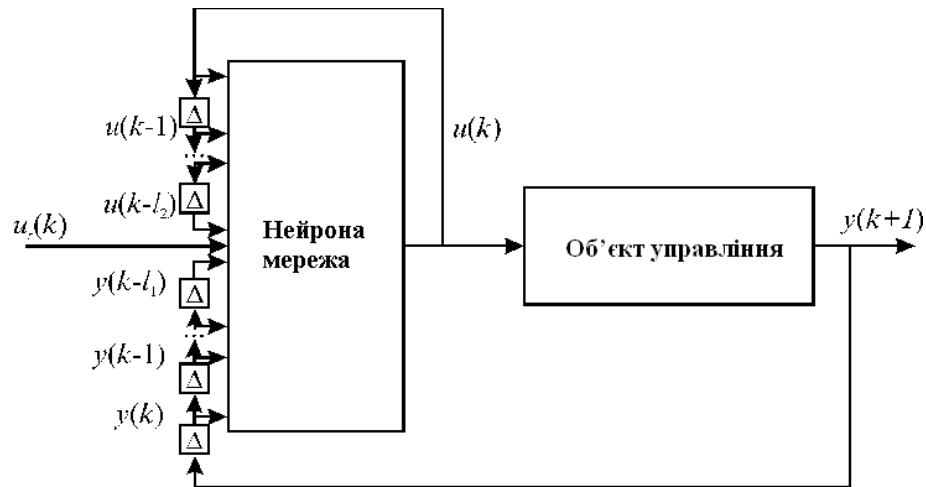


Рис. 3.33 – Система керування з нейроконтролером

Якщо перший тип САК з комбінованим регулятором є компромісним розв'язком у рамках класичного підходу, то другий тип що представлений на рисунку 3.31 побудований тільки на ШНМ.

В цьому другому випадку нейрорегулятор буде представлений нейронною мережею з двома шарами, як показано на рисунку 3.34.

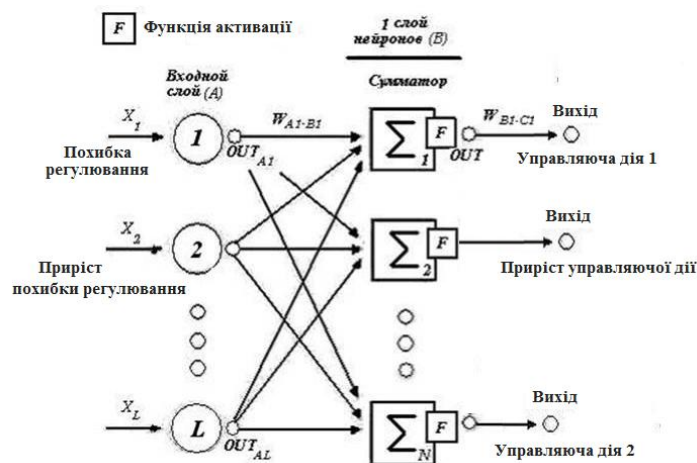


Рис. 3.34 – Одношарова нейронна мережа що виконую функції регулятора нейромережевого алгоритму керування

Метою навчання НК, у даному випадку, є одержання закону керування, що забезпечує задане (звичайно екстремальне) значення деякого функціонала якості I :

$$u(t) \Rightarrow I[y(t)] \rightarrow \text{ext}$$

Такий функціонал відповідає за поточний стан системи як показано на рисунку 3.35.

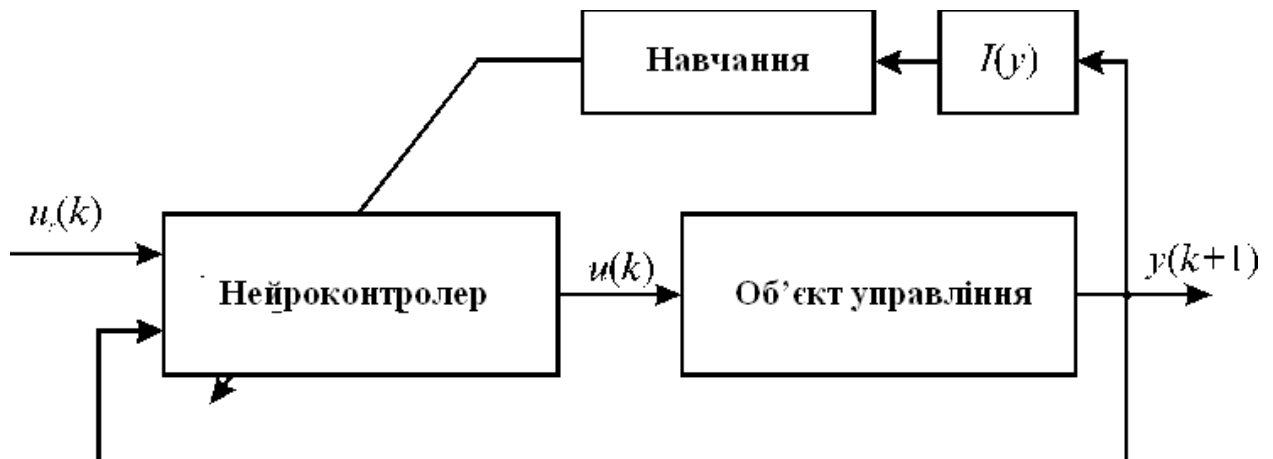


Рис. 3.35 – Нейромережева система керування з екстремальним показником якості регулювання

Може бути ще один альтернативний варіант нейромережевого алгоритму керування це система з регулятором з прогнозом. Регулятор з прогнозом NN Predictive Controller використовує модель об'єкта керування у вигляді нейронної мережі для того, щоб передбачати його майбутню поведінку. Алгоритм оптимізації обчислює керуючі сигнали, які мінімізують різницю між бажаними і дійсними змінами сигналу на виході моделі і таким чином оптимізує поведінку об'єкта на заданому інтервалі часу.

Проектування нейрорегулятора складається з двох етапів: етап ідентифікації об'єкту керування нейрорегулятора і етапу синтезу закону керування.

На етапі ідентифікації розробляється модель об'єкту у вигляді нейронної мережі, яка на етапі синтезу використовується для синтезу регулятора. Схема підсистеми ідентифікації показана на рис. 3.34.

Вона включає модель об'єкта керування у вигляді нейронної мережі, яка повинна бути навчена в автономному режимі так, щоб мінімізувати помилку між реакціями об'єкта і моделі на послідовність пробних сигналів u . Структурна схема на рисунку 3.37 ілюструє процес керування з прогнозом. Регулятор складається з нейромережевої моделі керованого об'єкта і блоку оптимізації. Блок оптимізації визначає значення, які мінімізують критерій якості керування, а відповідний керуючий сигнал управляє процесом.

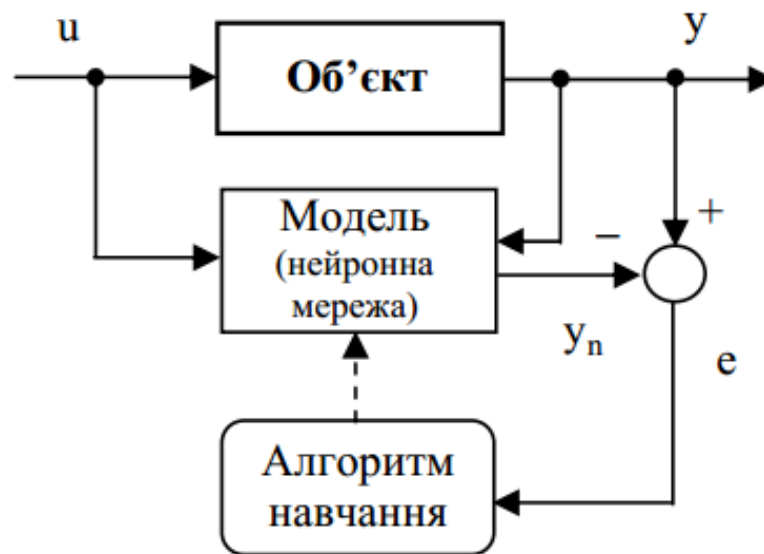


Рис. 3.36 – Схема підсистеми ідентифікації

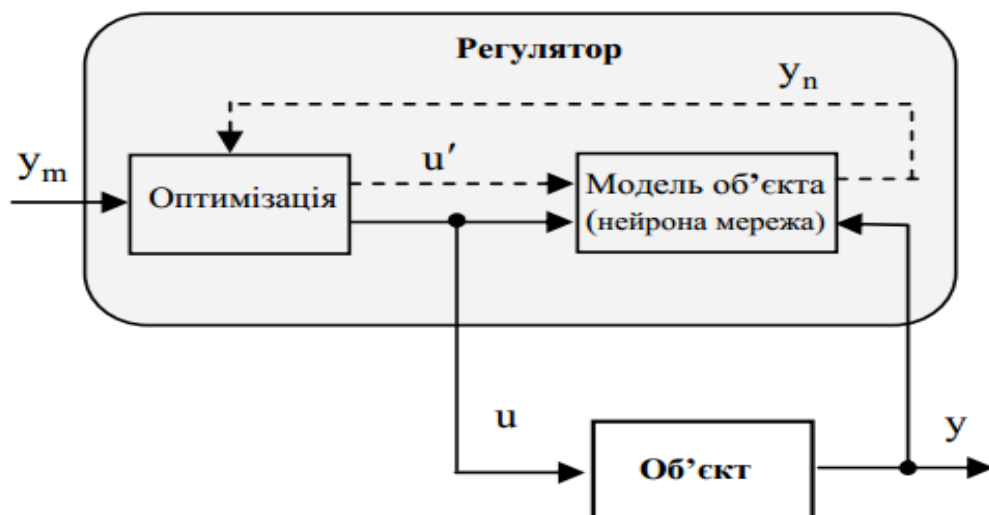


Рис. 3.37 – Структурна схема системи з регулятором, що використовує принцип передбачення

Якщо розглядати другий варіант нейромержевого алгоритму керування то нейрорегулятор можливо спочатку налаштувати також за методом зворотного поширення. В цьому випадку треба визначити кількість визначених похибок регулювання для тренування нейронної мережі. На рисунку 3.38 також зображені похибки на кожному нейроні для коректування ваг за методом зворотного поширення. Якщо така структура буде недостатня, то необхідно буде збільшити кількість нейронів в вхідному шарі мережі та збільшити кількість шарів до трьох.

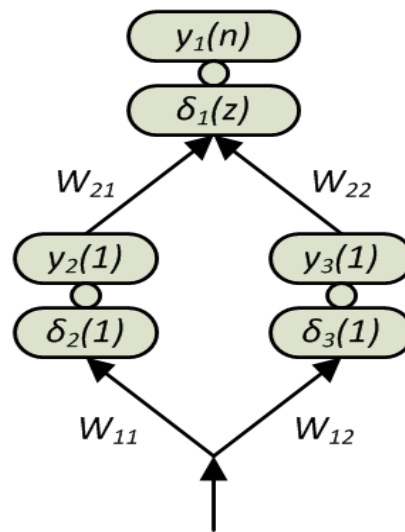


Рис. 3.38 – Структурна схема нейрорегулятора інтегральної або пропорційної складової

Для визначення ваг між нейронними з'єднаннями за методом зворотного поширення було використано програмне середовище MATLAB, що дозволяє згенерувати задану нейронну мережу на базі вхідних і вихідних значень сигналів. Таким чином, для тренування нейронної мережі необхідно указати вхідні і вихідні значення сигналів нейрорегулятора, а точніше, значення похибок регулювання та приріст управляючого впливу.

Штучна нейронна мережа, що виконує роль регулятора, синтезується на базі характеристик нечіткого логічного регулятора. Ці характеристики представляються у табличній формі у вигляді вхідних і вихідних значень

нечіткого регулятора (таблиця 3.2). Дані, представлені у таблиці 3.2, визначені на базі моделювання нечіткого регулятора.

Далі створюємо М-файл в середовищі Matlab і в цьому файлі прописуємо команди для створення і навчання нашого нейрорегулятора. Вхідні і вихідні значення нейрорегулятора були отримані на основі характеристик нечіткого логічного регулятора, отриманих на основі схеми моделювання, представленої на рисунку 3.39.

Таблиця 3.2 – Вхідні та вихідні значення сигналів регулятора

№	I	u	Δu
1	-3	0.28	0.009
2	-2	0.1867	0.006
3	-1	0.093	0.003
4	0	0	0
5	1	-0.1	- 0.002333
6	2	-0.2	- 0.004667
7	3	-0.3	- 0.007

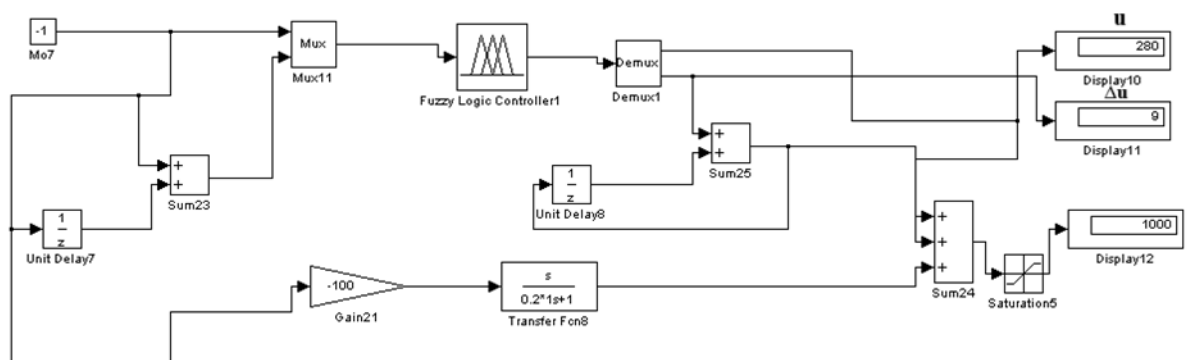


Рис. 3.39 – Схема для отримання даних для навчання нейронної мережі

В М-файлі було записано виконавчий код, що представлений на рисунках 3.40 і 3.41 відповідно для інтегральної та пропорційної складової регулятора. Представлений виконавчий код також можливо записати у

командній строчці Matlab – command window, в результаті чого згенерується відповідна нейронна мережа.

```
» p=[-3 -2 -1 0 1 2 3];
t=[0.28 0.1867 0.093 0 -0.1 -0.2 -0.3];
net=newff([-3 3], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
net.trainParam.epochs=100;
net=train(net, p, t);
a=sim(net, p)
gensim(net)
TRAINLM, Epoch 0/100, MSE 0.708542/0, Gradient 2.60022/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/100, MSE 0.000192375/0, Gradient 0.00443488/1e-
010
TRAINLM, Epoch 50/100, MSE 5.79625e-006/0, Gradient 0.000290294/1e-
010
TRAINLM, Epoch 75/100, MSE 3.74106e-007/0, Gradient 0.00152852/1e-
010
TRAINLM, Epoch 100/100, MSE 3.55758e-007/0, Gradient 6.68262e-
005/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.
a =
    0.2801    0.1863    0.0940   -0.0011   -0.0995   -0.2000   -0.3001
```

```

MATLAB Command Window
File Edit Window Help

To get started, type one of these: helpwin, helpdesk, or demo.
For product information, type tour or visit www.mathworks.com.

>> p=[-3 -2 -1 0 1 2 3];
t=[0.28 0.1867 0.093 0 -0.1 -0.2 -0.3];
net=newff([-3 3], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
net.trainParam.epochs=100;
net=train(net, p, t);
a=sim(net, p)
gensim(net)

TRAINLM, Epoch 0/100, MSE 0.708542/0, Gradient 2.60022/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/100, MSE 0.000192375/0, Gradient 0.00443488/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/100, MSE 5.79625e-006/0, Gradient 0.000290294/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/100, MSE 3.74106e-007/0, Gradient 0.00152852/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/100, MSE 3.55758e-007/0, Gradient 6.68262e-005/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

a =

    0.2801    0.1863    0.0940   -0.0011   -0.0995   -0.2000   -0.3001

```

Рис. 3.40 – Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворює пропорційну складову нейрорегулятора

```

>> p=[-3 -2 -1 0 1 2 3];
t=[0.009 0.006 0.003 0 -0.002333 -0.004667 -0.007]
net=newff([-3 3], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
net.trainParam.epochs=100;
net=train(net, p, t);
a=sim(net, p)
gensim(net)

t =

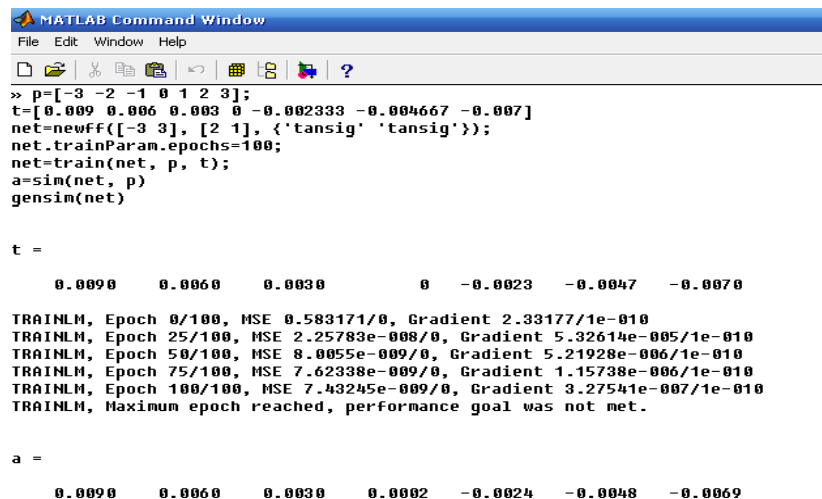
    0.0090    0.0060    0.0030         0   -0.0023   -0.0047   -0.0070

TRAINLM, Epoch 0/100, MSE 0.583171/0, Gradient 2.33177/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/100, MSE 2.25783e-008/0, Gradient 5.32614e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/100, MSE 8.0055e-009/0, Gradient 5.21928e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/100, MSE 7.62338e-009/0, Gradient 1.15738e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/100, MSE 7.43245e-009/0, Gradient 3.27541e-007/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

a =

    0.0090    0.0060    0.0030    0.0002   -0.0024   -0.0048   -0.0069

```



```

MATLAB Command Window
File Edit Window Help
>> p=[-3 -2 -1 0 1 2 3];
t=[0.009 0.006 0.003 0 -0.002333 -0.004667 -0.007]
net=newff([-3 3], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
net.trainParam.epochs=100;
net=train(net, p, t);
a=sim(net, p)
gensim(net)

t =

    0.0090    0.0060    0.0030         0   -0.0023   -0.0047   -0.0070

TRAINLM, Epoch 0/100, MSE 0.583171/0, Gradient 2.33177/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/100, MSE 2.25783e-008/0, Gradient 5.32614e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/100, MSE 8.0055e-009/0, Gradient 5.21928e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/100, MSE 7.62338e-009/0, Gradient 1.15738e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/100, MSE 7.43245e-009/0, Gradient 3.27541e-007/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

a =

    0.0090    0.0060    0.0030    0.0002   -0.0024   -0.0048   -0.0069

```

Рис. 3.41 – Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворює інтегральну складову нейрорегулятора

В даному виконавчому коді p – вхідні значення нейромережі (похибка регулювання), t – відповідне значення виходу нейромережі. На третій строчці задаємо діапазон, кількість шарів нейромережі та функції активації. Також задаємо кількість кроків тренування, команду тренування нейромережі та генерації

Характеристики точності навчання показані на рисунку 3.42, з яких можливо побачити, що десь на 30-м кроці навчання коректування ваг між нейронними з'єднаннями було закінчено.

Водночас з генерацією НМ в головному вікні Matlab відображаються фактичні значення вихідного сигналу i -того вихідного нейрону мережі.

На рисунках 3.43 та 3.45 зображено бажані та фактичні значення вихідного сигналу i -того вихідного нейрону НМ, що відтворює I – складову та Π – складову нейрорегулятора вологості окремо.

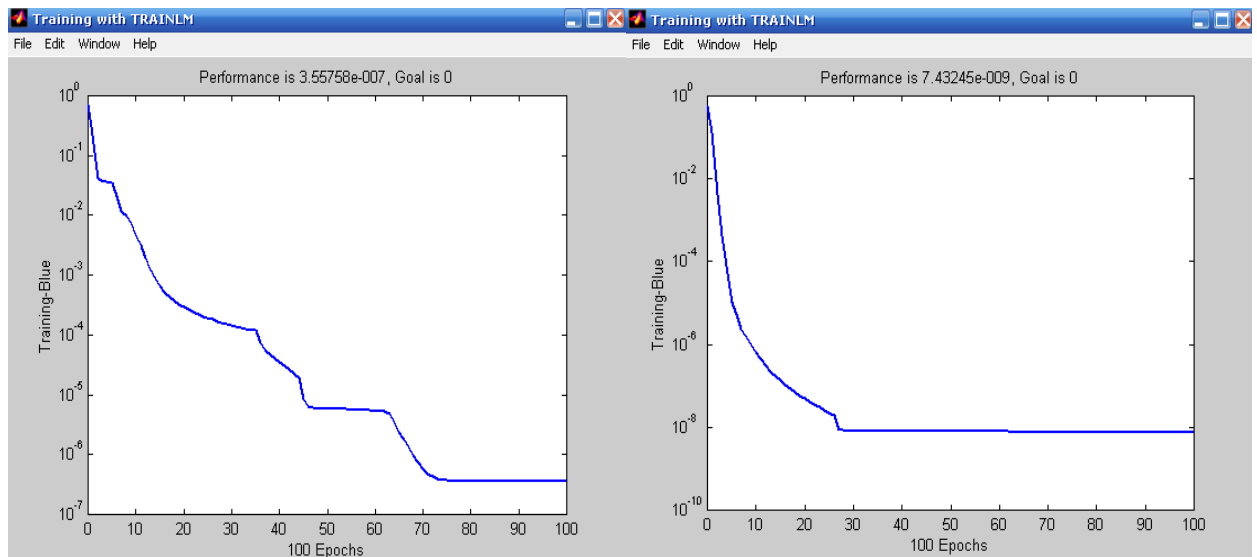


Рис. 3.42 – Характеристика точності навчання пропорційної та інтегральної складової нейрорегулятора

Фактичні значення:
 0.2801 0.1863 0.0940 -0.0011 -0.0995 -0.2000 -0.3001
 Бажані значення:
 0.28 0.1867 0.093 0 -0.1 -0.2 -0.3

Рис. 3.43 - бажані та фактичні значення вих. сигналу і-того вихідного нейрону НМ, що відтворює П – складову нейрорегулятора

Фактичні значення:
 0.0090 0.0060 0.0030 0.0002 -0.0024 -0.0048 -0.0069
 Бажані значення:
 0.009 0.006 0.003 0 -0.002333 -0.004667 -0.007

Рис. 3.44 - бажані та фактичні значення вих. сигналу і-того вихідного нейрону НМ, що відтворює І – складову нейрорегулятора

Виходячи з цих даних, представлених на рисунках 3.43 та 3.44, розрахуємо похибки для вихідного шару та похибки для і-тих нейронів прихованого шару НМ за методом зворотного поширення для оцінки якості тренування нейронної мережі. Згідно навчанню штучної нейронної мережі за методом зворотного розповсюдження похибки, похибка для вихідного шару нейронної мережі визначається за наступною формулою (1):

$$\delta_i(n) = (y_i(n) - d_i) \cdot y_i(n) \cdot (1 - y_i(n)) \quad (1)$$

де d_i – бажане значення вихідного сигналу i -того вихідного нейрону мережі.

y_i – фактичне значення вихідного сигналу i -того вихідного нейрону мережі.

Похибка для i -того нейрону прихованого шару розраховується за наступною формулою (2):

$$\delta_i(n) = y_i(n) \cdot (y_i(n) - d_i) \cdot \sum w_{in+1} \cdot \delta_i(n+1) \quad (2)$$

де w_{in+1} – вага міжнейронного з'єднання $n+1$ шару; $\delta_i(n+1)$ – похибка i -того нейрону $n+1$ шару.

Таким чином, розрахунок похибок для Π – складової нейрорегулятора наступний:

Розрахунок помилки вихідного шару:

$$\begin{aligned} \delta_1(z) &= (y_1(n) - d_1) * (y_1(n)(1 - y_1(n))) = (0.1863 - 0.1867) * (0.1863) \\ &* (1 - 0.1863) = -0,000060636924 \end{aligned}$$

Розрахунок помилки для i -тих нейронів прихованого шару:

$$\begin{aligned} \delta_2(1) &= y_2(1) * (1 - y_2(1)) * W_{21} * \delta_1(z) = 0.7543 * (1 - 0.7543) * \\ &(-0.090802279331460109) * -0,000060636924 = 0,00000102043 \\ \delta_3(1) &= y_3(1) * (1 - y_3(1)) * W_{22} * \delta_1(z) = 0.5327 * (1 - 0.5327) * \\ &(-0.1663176858009808) * -0,000060636924 = 0,00000251046 \end{aligned}$$

Розрахунок помилок для I – складової нейрорегулятора:

Розрахунок помилки вихідного шару:

$$\begin{aligned} \delta_1(z) &= (y_1(n) - d_1) * (y_1(n)(1 - y_1(n))) = (0.0024 - 0.002333) * \\ &(0.0024) * (1 - 0.0024) = -0,0000501114432 \end{aligned}$$

Розрахунок помилки для i -тих нейронів прихованого шару:

$$\begin{aligned} \delta_2(1) &= y_2(1) * (1 - y_2(1)) * W_{21} * \delta_1(z) = 0,9599 * (1 - 0,9599) * \\ &7,3655548636428527 * -0,0000501114432 = -0,0000142073 \\ \delta_3(1) &= y_3(1) * (1 - y_3(1)) * W_{22} * \delta_1(z) = 0,9766 * (1 - 0,9766) * \\ &(-7,3307275810928836) * -0,0000501114432 = 0,00000839492 \end{aligned}$$

Результати розрахунків показали, що помилки практично нульові, отже ними можна знехтувати, а розрахунок значень наведеної погрішності не проводити.

Сформовані нейроні мережі були визначені у схемі моделювання замість нечіткого регулятора, як показано на рисунку 3.16.

У такий спосіб була синтезована модель САК з нейрорегулятором засобами середовища MATLAB\Simulink, фрагмент структурної схеми якої представлений на рисунку 3.45.

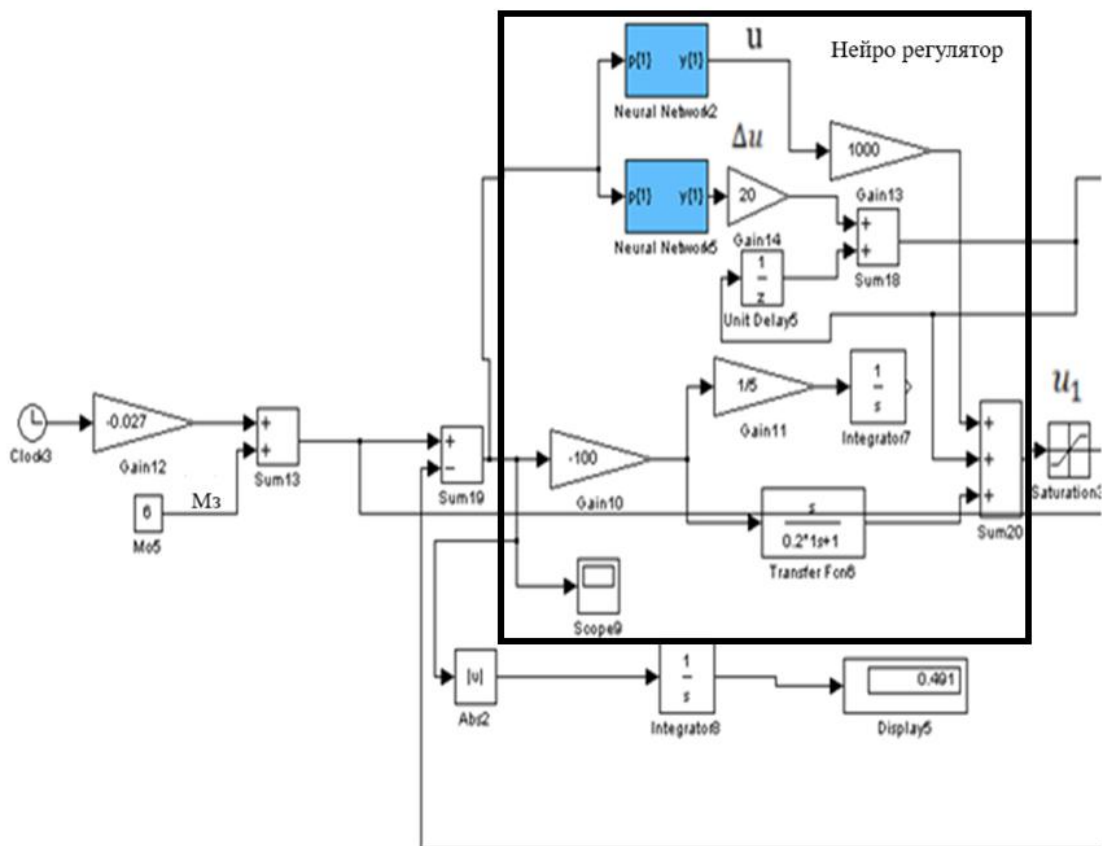


Рис. 3.45 – Фрагмент структурної схеми моделі САК з нейрорегулятором яка представлена засобами середовища MATLAB\Simulink

На основі даних параметрів сформованої нейронної мережі була визначена схема нейрорегулятора у середовищі MATLAB\Simulink.

Схема нейрорегулятора, що представлена на рисунку 3.46, є розгорнутою схемою, що представлена на попередньому рисунку 3.45.

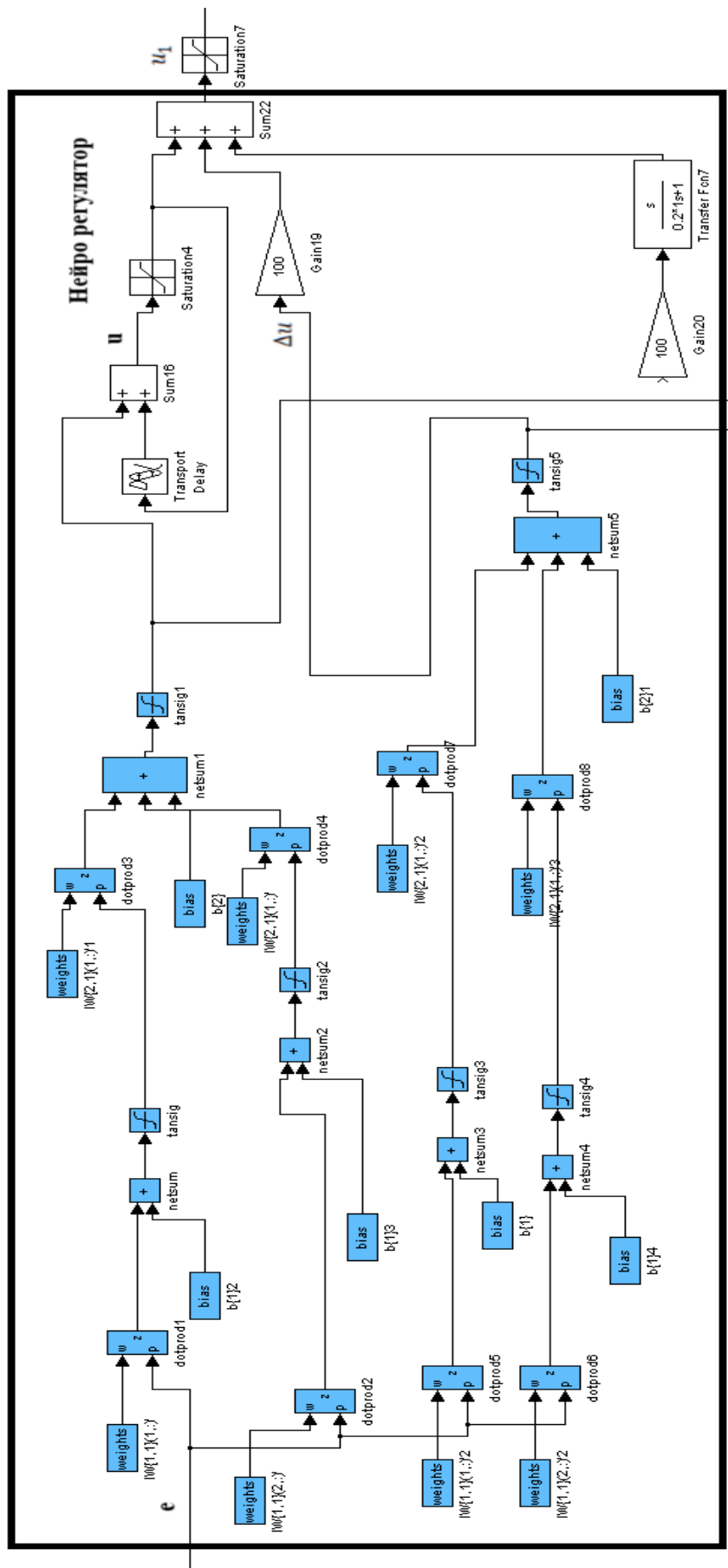


Рис. 3.46 – Схема моделирования нейронного регулятора

У результаті моделювання САК з нейрорегулятором були отримані графіки перехідних процесів при тих же умовах, які були при моделюванні САК з нечітким регулятором та традиційним ПІД-регулятором.

Ці графіки представлені на рисунку 3.47. З графіків перехідних процесів можливо побачити, що за якістю регулювання САК з нейрорегулятором працює незначно гірше, ніж САК з нечітким регулятором.

Також максимальне динамічне відхилення при детермінованому збуренні значно більше в САК з нейрорегулятором, як показано на рисунку 3.47. Незважаючи на це регулятор, що синтезований на базі штучних нейронних мереж, має 8-м ваг між нейронних з'єднань, а саме параметри які можна оптимізувати для покращення якості регулювання. Також, як видно з рисунку 3.46, є шість зміщень, які також можливо оптимізувати.

Можливо зробити висновок, що виходячи з якості регулювання різних САК необхідно нейрорегулятор оптимізувати при тих же умовах, як і попередній традиційний ПІД-регулятор для визначення остаточного висновку про доцільність застосування різних САК.

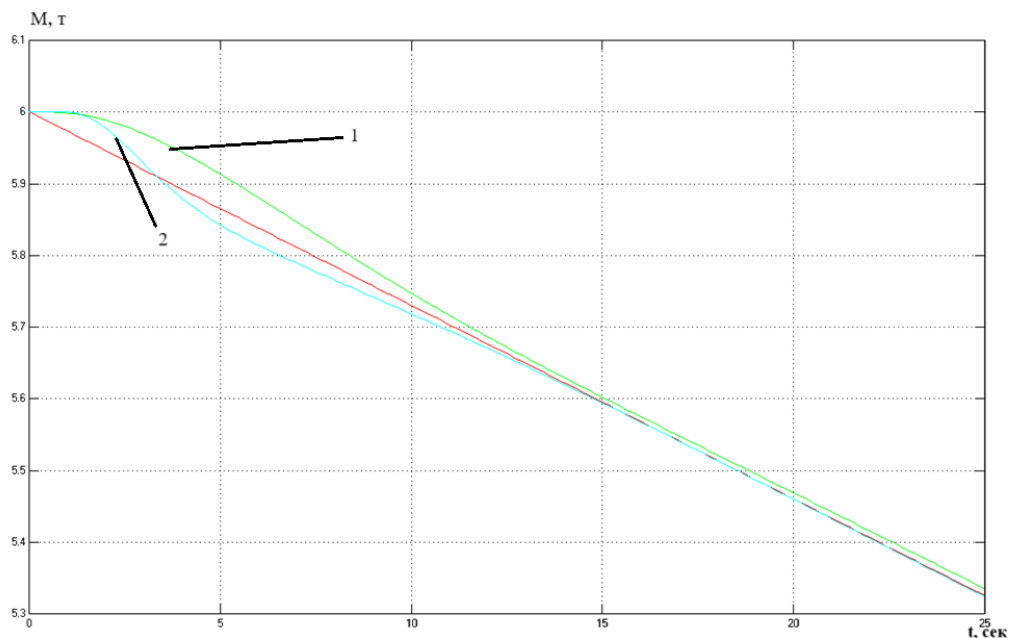


Рис. 3.47 – Графіки перехідних процесів, отримані в результаті моделювання різних САК, графік 1 – перехідний процес у САК з нечітким регулятором; графік 2 – перехідний процес у САК з оптимізованим регулятором, побудованим на базі штучних нейронних мереж

3.8 Параметрична оптимізація САК з нейрорегулятором

Для покращення якості регулювання у роботі була проведена параметрична оптимізація САК з нейронним регулятором.

Оптимізувались чотири параметри настроювання нейрорегуляторів – це вагові коефіцієнти нейронних з'єднань першого-вхідного шару штучної нейронної мережі.

Оптимізація нейронного регулятора проводилась при таких же умовах, які були при оптимізації САК з традиційним ПД регулятором.

Таким чином, інтегральний показник якості функціонування при оптимізації був обраний відповідно таким же, як при оптимізації САК з традиційним ПД регулятором.

У програмному середовищі MATLAB\Simulink 5.2 була визначена модель САК з нейрорегулятором і параметричним оптимізатором, структурна схема яка відображена на рисунку 3.48.

У результаті параметричної оптимізації були отримані графіки перехідних процесів до і після оптимізації, а також оптимальні визначені ваги міжнейронних з'єднань першого шару нейронної мережі.

Графіки відповідних перехідних процесів та значення вагових коефіцієнтів представлені у відповідному вікні результатів оптимізації, представленою на рисунку 3.50.

На рисунку 3.50 представлений результат оптимізації, який був отриманий при декількох попередніх процесах оптимізації САК з ПД регулятором з визначеному інтегральному критерії якості роботи системи.

Згідно з рисунків 3.5 та 3.50 можна побачити що вдалося значно покращити якість регулювання порівнявши значення інтегральних критеріїв якості роботи системи. Значення інтегрального показника при САК з ПД регулятором 0,139 а при САК з нейрорегулятором 0,125.

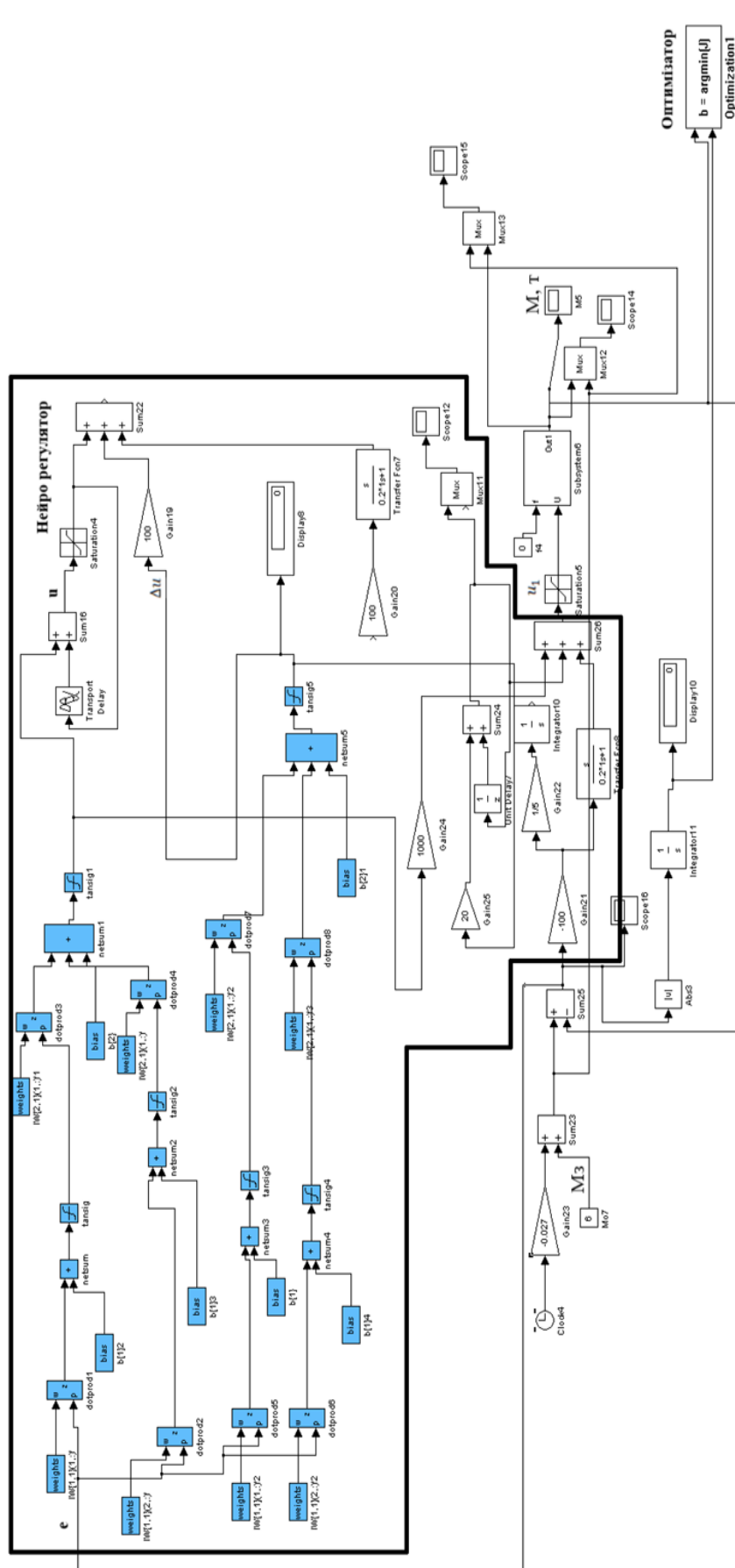


Рис. 3.48 – Структурна схема моделі САК з нейронним регулятором і параметричним оптимізатором, що реалізована засобами MATLAB\Simulink для визначення оптимальних параметрів системи керування за умови нелінійності статичної характеристики каналу регулювання

Таким чином можливо ще покращити роботу нейрорегулятора за якістю функціонування, ще далі оптимізувавши обрані вагові коефіцієнти, а також вагові коефіцієнти між нейронних з'єднань вихідного шару нейронної мережі.

Оптимізація
Конкретизація задачі оптимального параметричного синтезу (ОПС)

☐ ОПС за умов параметричної невизначеності ОУ.
☒ ОПС при фіксованих параметрах ОУ.

-Параметри об'єкта управління (ОУ)

Імена параметрів: ko T tau

Номинальні значення: 1 1 0.8

Нижні значення діапазонів: 0.8 * 1 0.85 0.8 * 2.5

Верхні значення діапазонів: 1.2 * 1 1.2 * 5 1.2 * 2.5

- Оптимізовані параметри (аргументи)

Імена параметрів: w1 w2 w3 w4 w5 w6 w7 i

Початкові наближення: -0.0687 -0.4237 -0.1615

Нижні обмеження: -10 -10 -10 -10 -10 -10 -10

Верхні обмеження: 10 10 10 10 10 10 10

Умови оптимізації (Симплекс метод Нелдера-Міда)

Максимальна кількість кроків процедури оптимізації: 100

Мінімальне збільшення аргументів: 0.01

Мінімально значуще збільшення критерію: 0.001

-Візуалізація результатів

Кількість графіків: 1

Імена змінних відображаються на графіках: y

Рис. 3.49 – Вікно оптимізатора до початку оптимізації параметрів регулятора, представленого штучною нейронною мережею, системи автоматичного керування

Результати параметричної оптимізації показують, що нейрорегулятор на відмінність від традиційного нечіткого регулятора, має велику можливість налаштування під обраний об'єкт з нелінійною статичною характеристикою каналів регулювання. Для визначення принципової придатності оптимізованого нейрорегулятора необхідно визначити, чи не втрачає стійкість САК при різних параметрах системи, які можуть бути відхилені від визначених на етапі розробки моделі у діапазоні $\pm 20\%$.

Таким чином, після параметричної оптимізації була перевірена система на грубість для оцінки принципової придатності оптимізованого нейрорегулятора САК (рис 3.51).

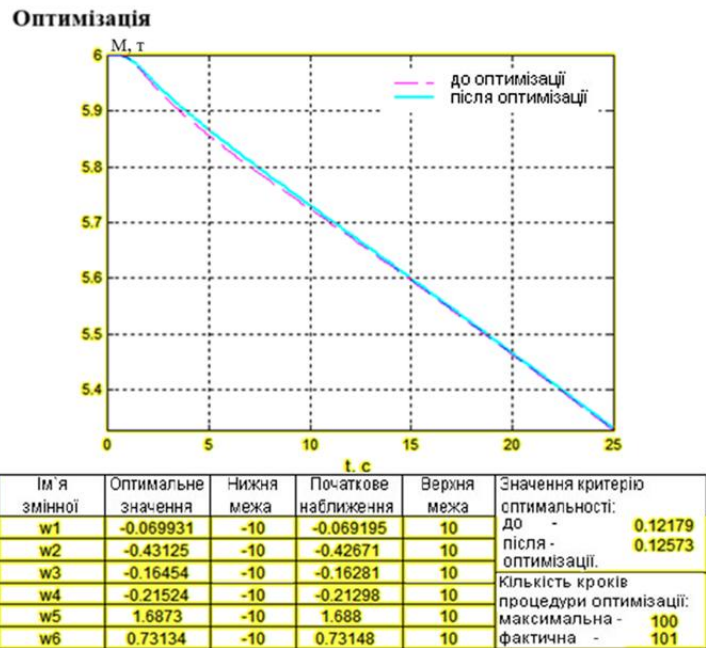


Рис. 3.50 – Вікно результатів оптимізації параметрів регулятора, представленого штучною нейронною мережею, системи автоматичного керування

Параметри перевірки системи на грубість представлені на рисунку 3.49. Значення цих параметрів не відрізняються від попереднього випадку коли була виконана перевірка на грубість системи з ПД-регулятором.

Перевірка системи на грубість САР з нейрорегулятором показала що система, завдяки використанню нейрорегулятора, стало значно грубою порівняно з САР з ПД регулятором при каналі регулювання що характеризується нелінійною статичною характеристикою. Це можна побачити порівнявши результати представлені на рисунках 3.6 та 3.51. Згідно з рисунку 3.6 система з ПД регулятором незначно груба порівняно з САР нейрорегулятором і це в першу чергу тому що нейрорегулятор є нелінійним елементом системи який в результаті оптимізації можливо підстроїти до роботи з каналом регулювання що характеризується нелінійною статичною характеристикою.



Рис. 3.51 – Вікно результатів перевірки на грубість САР з нейрорегулятором

Результати перевірки системи на грубість за допомогою відповідного програмного забезпечення, вбудованого в середовище MATLAB\Simulink, показав, що система не втрачає стійкість при різних параметрах у діапазоні $\pm 20\%$.

Отже синтезований нейрорегулятор можливо перетворити у відповідний код – програму для визначеного промислового контролера для практичного застосування його у відповідній системі керування.

3.9 Аналіз функціонування різних САК за якістю регулювання за умов впливів, що збурюють

На заключному етапі розробки САК був виконаний порівняльний аналіз функціонування різних САК за якістю регулювання. У результаті моделювання були отримані графіки перехідних процесів різних САК за виходом системи на номінальний режим функціонування. З графіків перехідних процесів можливо

побачити, що час регулювання при виході системи на номінальний режим функціонування значно менший при САК з регулятором, що представлений на базі штучної нейронної мережі.

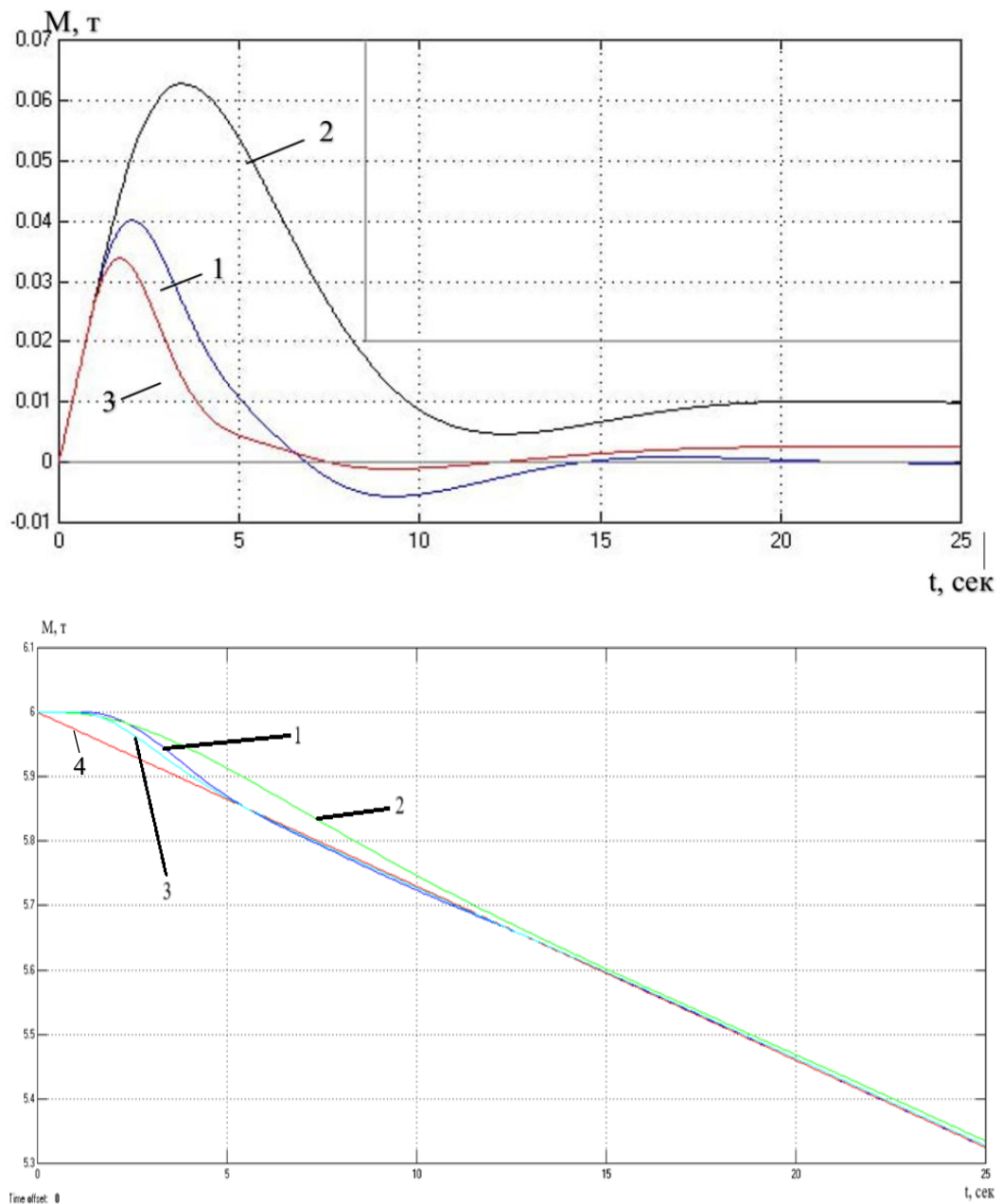


Рис. 3.52 – Результати порівняння якості роботи САК базової структури (1), САК з нечітким регулятором (2), САК з оптимізованим регулятором, побудованим на базі штучних нейронних мереж (3) та задане значення маси (4)

Також на основі аналізатора імовірнісних характеристик, що був вбудований у середовище MATLAB\Simulink, була визначена якість регулювання різних САК при випадкових впливах що збурюють. У даному випадку порівнюються середні квадратичні відхилення значень похибки регулювання різних САК при випадкових впливах. Результати представлені на рисунку 3.53, у якому зображене вікно результатів аналізу, де показані середні квадратичні відхилення і математичні очікування значень похибки регулювання при різних САК.

З рисунку 3.53 можливо побачити, що за середньо квадратичним відхиленням САК з традиційним ПД-регулятором і САК з нейронним регулятором практично функціонують ідентично, а САК з нечітким регулятором незначно гірше. В кінцевому випадку показники функціонування різних САК за якістю регулювання були зведені до таблиці 3.3.

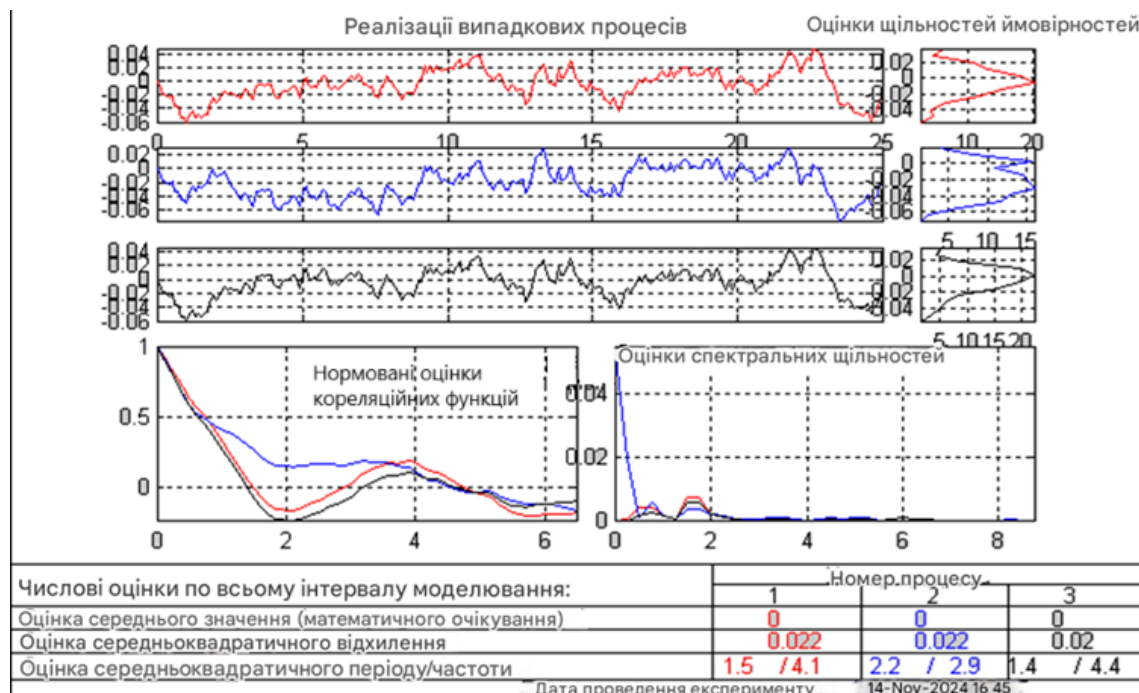


Рис. 3.53 - Вікно результатів аналізу аналізатора імовірнісних характеристик

Таблиця 3.3 – Показники якості регулювання різних САК

САК	САК з традиційним ПД- регулятором	САК з нечітким регулятором	САК з регулятором, представленим штучною нейронною мережею
Максимальне динамічне відхилення	$\approx 0,05$	$\approx 0,1$	$\approx 0,045$
Інтегральний показник	0,139	-	0,125
Математичне очікування ΔM	0	0	0
Середньоквадратичне відхилення	0,022	0,022	0,02

З таблиці 3.3 можливо зробити остаточний висновок, що за якістю регулювання САК з нейронним регулятором не значно краще функціонує, ніж інші розглянуті САК. САК з традиційним ПД-регулятором і САК з нечітким регулятором функціонують за якістю регулювання практично ідентично при об'єкті з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання.

3.10 Розробка програмного забезпечення для реалізації нейрорегулятора на базі промислового контролера

За допомогою Simulink PLC Coder автоматично одержуємо згенерований код для промислових систем керування. А саме, згенерований вихідний код у структурованому текстовому форматі з моделі Simulink. Для генерації коду необхідна програма Matlab, починаючи з версії 2010a. Розробляти необхідно програму для ПЛК Siemens SIMATIC STEP 7.

Спочатку вибираємо Subsystem Parametrs на блоці регулятора, синтезованого на основі штучної нейронної мережі. У цьому вікні відзначаємо «Treat as atomic unit» і натискаємо кнопку Ок. На функціональному блоці натискаємо праву клавішу миші і вибираємо PLC Coder / Options.

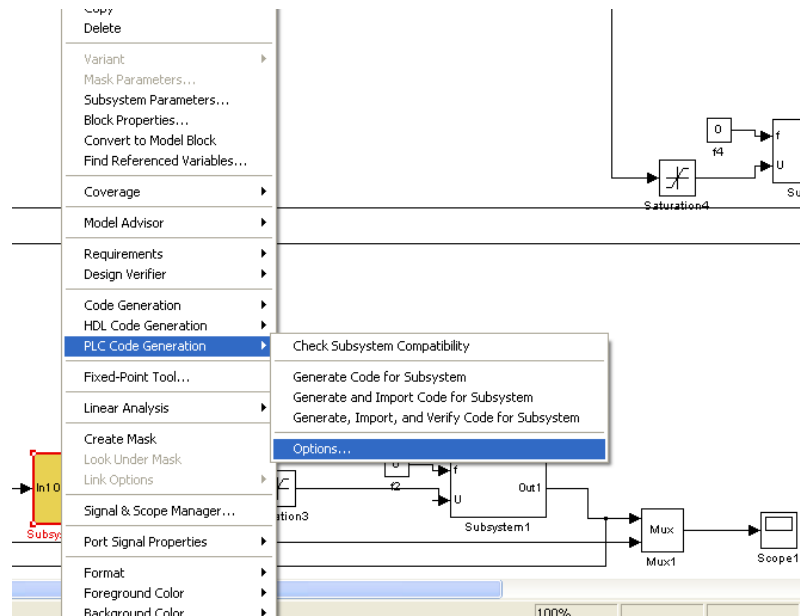


Рис. 3.54 – Вікно налаштування підсистем для їх конвертації

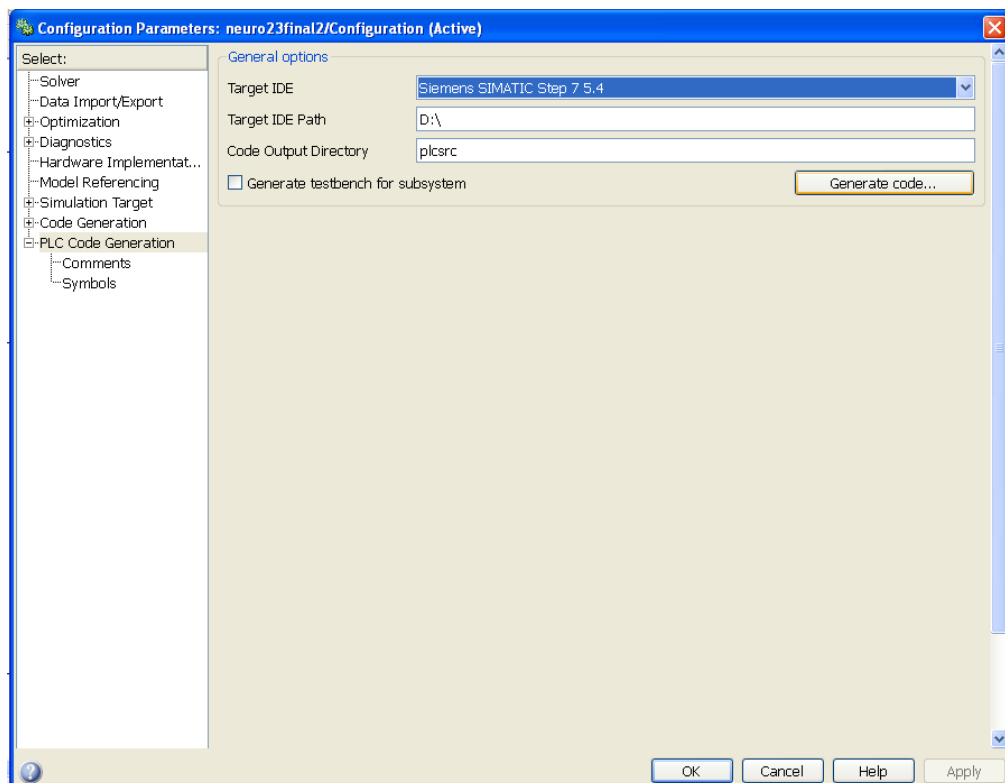


Рис. 3.55 – Вікно налаштування пакету SimulinkPLCCoder

Далі вибираємо, у який тип ПЛК буде згенерований код (Target IDE) і натискаємо клавішу Generate code. Згенерований код для SIMATIC STEP 7 наступний:

```
(*
*
* File: neuro23final2.scl
*
* IEC 61131-3 Structured Text (ST) code generated for
subsystem "neuro23final2/Subsystem"
*
* Model name                : neuro23final2
* Model version              : 1.10
* Model creator              : Russ
* Model last modified by     : Russ
* Model last modified on     : Sun Nov 18
22:45:53 2012
* Model sample time          : 0.1s
* Subsystem name             :
neuro23final2/Subsystem
* Subsystem sample time      : 0.1s
* Simulink PLC Coder version : 1.3 (R2012a) 29-
Dec-2011
* ST code generated on       : Sun Nov 18
22:47:08 2012
*
* Target IDE selection       : Siemens SIMATIC
Step 7 5.4
* Test Bench included        : No
*
```

```

*)
FUNCTION_BLOCK Subsystem
VAR_INPUT
    ssMethodType: INT;
    In1: REAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    Out1: REAL;
END_VAR
VAR
    UnitDelay1_DSTATE: REAL;
    c_DiscreteTransferF: REAL;
    rtb_Product: REAL;
    rtb_Product_p: REAL;
END_VAR
CASE ssMethodType OF
    0:

        (* InitializeConditions for UnitDelay:
        '<S1>/Unit Delay1' *)
        UnitDelay1_DSTATE := 0.0;

        (* InitializeConditions for
        DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn1' *)
        c_DiscreteTransferF := 0.0;
    1:

        (* Sum: '<S1>/Sum1' incorporates:
        * Constant: '<S10>/one'
        * Constant: '<S10>/one1'

```

```

* Constant: '<S12>/one'
* Constant: '<S12>/one1'
* Constant: '<S15>/one'
* Constant: '<S15>/one1'
* Constant: '<S1>/IW{1,1}(1,:) '3'
* Constant: '<S1>/IW{1,1}(2,:) '3'
* Constant: '<S1>/IW{2,1}(1,:) '6'
* Constant: '<S1>/IW{2,1}(1,:) '7'
* Constant: '<S1>/b{1}1'
* Constant: '<S1>/b{1}7'
* Constant: '<S1>/b{2}4'
* Gain: '<S10>/Gain'
* Gain: '<S10>/Gain1'
* Gain: '<S12>/Gain'
* Gain: '<S12>/Gain1'
* Gain: '<S15>/Gain'
* Gain: '<S15>/Gain1'
* Gain: '<S1>/Gain3'
* Inport: '<Root>/In1'
* Math: '<S10>/Exp'
* Math: '<S10>/Reciprocal'
* Math: '<S12>/Exp'
* Math: '<S12>/Reciprocal'
* Math: '<S15>/Exp'
* Math: '<S15>/Reciprocal'
* Product: '<S19>/Product'
* Product: '<S20>/Product'
* Product: '<S21>/Product'
* Product: '<S22>/Product'
* Sum: '<S10>/Sum'

```

```

* Sum: '<S10>/Sum1'
* Sum: '<S12>/Sum'
* Sum: '<S12>/Sum1'
* Sum: '<S15>/Sum'
* Sum: '<S15>/Sum1'
* Sum: '<S1>/netsum10'
* Sum: '<S1>/netsum11'
* Sum: '<S1>/netsum9'
* UnitDelay: '<S1>/Unit Delay1'
*
* About '<S10>/Exp':
* Operator: exp
*
* About '<S10>/Reciprocal':
* Operator: reciprocal
*
* About '<S12>/Exp':
* Operator: exp
*
* About '<S12>/Reciprocal':
* Operator: reciprocal
*
* About '<S15>/Exp':
* Operator: exp
*
* About '<S15>/Reciprocal':
* Operator: reciprocal *)
rtb_Product := (((1.0 / (EXP((((1.0 /
(EXP((-0.16154136524557292 * In1) +
0.55908837956198709) * -2.0) + 1.0)) *

```

```

2.0) - 1.0) * 0.626792271803028) + (((1.0
/ (EXP((-0.21144667835571829 * In1) + -
1.6573707496850454) * -2.0) +
1.0)) * 2.0) - 1.0) * 0.74432954905466964))
+ 0.37321528334113907) * -2.0) + 1.0)) * 2.0) - 1.0) *
20.0) + UnitDelay1_DSTATE;

```

```

(* DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer
Fcn1' incorporates:

```

```

    * Gain: '<S1>/Gain1'
    * Inport: '<Root>/In1' *)

```

```

    rtb_Product_p := ((-100.0 * In1) - (0.01 *
c_DiscreteTransferF)) / 0.074;

```

```

(* Outport: '<Root>/Out1' incorporates:

```

```

    * Constant: '<S11>/one'
    * Constant: '<S11>/one1'
    * Constant: '<S13>/one'
    * Constant: '<S13>/one1'
    * Constant: '<S14>/one'
    * Constant: '<S14>/one1'
    * Constant: '<S1>/IW{1,1}(1,:) '1'
    * Constant: '<S1>/IW{1,1}(2,:) '1'
    * Constant: '<S1>/IW{2,1}(1,:) '4'
    * Constant: '<S1>/IW{2,1}(1,:) '5'
    * Constant: '<S1>/b{1}5'
    * Constant: '<S1>/b{1}6'
    * Constant: '<S1>/b{2}3'

```

```

* DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete
Transfer Fcn1'
* Gain: '<S11>/Gain'
* Gain: '<S11>/Gain1'
* Gain: '<S13>/Gain'
* Gain: '<S13>/Gain1'
* Gain: '<S14>/Gain'
* Gain: '<S14>/Gain1'
* Gain: '<S1>/Gain2'
* Inport: '<Root>/In1'
* Math: '<S11>/Exp'
* Math: '<S11>/Reciprocal'
* Math: '<S13>/Exp'
* Math: '<S13>/Reciprocal'
* Math: '<S14>/Exp'
* Math: '<S14>/Reciprocal'
* Product: '<S16>/Product'
* Product: '<S17>/Product'
* Product: '<S18>/Product'
* Product: '<S23>/Product'
* Sum: '<S11>/Sum'
* Sum: '<S11>/Sum1'
* Sum: '<S13>/Sum'
* Sum: '<S13>/Sum1'
* Sum: '<S14>/Sum'
* Sum: '<S14>/Sum1'
* Sum: '<S1>/Sum2'
* Sum: '<S1>/netsum6'
* Sum: '<S1>/netsum7'
* Sum: '<S1>/netsum8'

```



```

*
* About '<S11>/Exp':
*   Operator: exp
*
* About '<S11>/Reciprocal':
*   Operator: reciprocal
*
* About '<S13>/Exp':
*   Operator: exp
*
* About '<S13>/Reciprocal':
*   Operator: reciprocal
*
* About '<S14>/Exp':
*   Operator: exp
*
* About '<S14>/Reciprocal':
*   Operator: reciprocal *)
Out1 := (((((1.0 / (EXP((((((1.0 / (EXP((-
0.068740707152143629 * In1) + 0.45521354151050569) * -
2.0) + 1.0)) *
2.0) - 1.0) * 1.6791636050720538) + (((1.0
/ (EXP((-0.42370036859654192 * In1) + -
3.1341932199382536) * -2.0) +
1.0)) * 2.0) - 1.0) * 0.73240199906239867))
+ 0.012928817369012734) * -2.0) + 1.0)) * 2.0) - 1.0) *
1000.0) +
rtb_Product) + ((0.3738 * rtb_Product_p) +
(-0.3738 * c_DiscreteTransferF));

```

```

(* Update for UnitDelay: '<S1>/Unit Delay1' *)
UnitDelay1_DSTATE := rtb_Product;

(* Update for DiscreteTransferFcn:
'<S1>/Discrete Transfer Fcn1' *)
c_DiscreteTransferF := rtb_Product_p;
END_CASE;
END_FUNCTION_BLOCK

```

Програма представлена структурованою мовою керування Structured Text (ST), за синтаксисом близька до [Pascal](#); Structured Text (ST) — мова програмування стандарту [IEC61131-3](#).

Призначена для програмування промислових [контролерів](#) і операторських станцій. Основою St-програми є вирази. Вирази складаються з операндів (констант і змінних) і операторів.

3.11 Висновки за розділом 3

В процесі виконання роботи була розроблена модель САК з нечітким регулятором. Нечіткий регулятор розроблений у відповідному редакторі середовища MATLAB\Simulink. Були визначені функції приналежності до нечітких множин, сформована база правил функціонування регулятора у табличному вигляді та у вікні відповідного редактора, визначений алгоритм нечіткого виводу – Сугено 0-порядку.

Було встановлено, що за якістю регулювання така САК функціонує незначно гірше, ніж САК з традиційним ПІД-регулятором при об'єкті керування з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання.

Для подальшої параметричної оптимізації САК, за характеристиками нечіткого регулятора було виконано тренування визначеної штучної нейронної мережі, яка може виконувати роль нейрорегулятора. Тренування штучної нейронної мережі було виконано також засобами середовища

MATLAB\Simulink за відповідним виконавчим кодом. Була розроблена модель САК з регулятором, що представляється штучною нейронною мережею. Параметрична оптимізація САК з нейрорегулятором були проведена при тих же умовах, що і САК з традиційним ПД-регулятором.

У результаті моделювання різних САК було встановлено, що за якістю регулювання САК з нейрорегулятором функціонує не значно краще, ніж інші САК, це за інтегральним показником якості регулювання - відповідно 0,12 при САК з нейрорегулятором і 0,139 при САК з традиційним ПД-регулятором.

В заключній частині для практичної реалізації нейрорегулятора була сформована програма для промислового контролера.

Таким чином, на основі виконаного синтезу і аналізу різних САК можна зробити заключний висновок, що нейрорегулятор має принципову придатність для практичного використання на базі промислового контролера при об'єктах керування з нелінійними характеристиками за каналам регулювання.

РОЗДІЛ 4. УДОСКОНАЛЕННЯ САР НА ОСНОВІ РОЗВИТКУ ІІІ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ

4.1 Опис загальних принципів побудови модернізованої системи керування.

Найчастіше на змінні об'єкта керування (ОК) регламентами накладаються обмеження, порушення яких може мати дуже несприятливі наслідки. Вони можуть призводити до аварійних зупинок обладнання, втрат сировини та енергоносіїв, зниження якості продукції, необхідність мати великий штат персоналу та ремонтних служб. Ситуація посилюється, якщо найбільш ефективні режими роботи ОК близькі до гранично-допустимих, ОК є суттєво нестаціонарним, схильний до інтенсивних неконтрольованих збурень, має запізнення в каналах керування, а наслідки порушень тяжкі.

САР такими об'єктами включають:

- а) системи (контуру) автоматичного регулювання (САР) регламентованих змінних $y(t)$, що забезпечують їх стабілізацію на околицях заданих значень (уставок) $y^{зд}(t)$;
- б) системи захисту, що запобігають розвитку несприятливих наслідків, обумовлених порушенням регульованої змінної $y(t)$ встановлених регламентом гранично допустимих значень $y^{гп}$ (подія S).

При побудові САК такими об'єктами є дві альтернативи:

1. Реалізувати звичайну САР, задане значення для якої встановити відповідним найбільш несприятливій ситуації, яка може виникнути під час роботи системи та таким чином запобігти порушенню $y(t)$ $y^{гп+}$.

Недоліки:

- низька ефективність роботи ОК завжди;
- найнесприятливіша ситуація апіорі невідома, тому гарантувати відсутність події S неможливо навіть з урахуванням прийнятих

несприятливих умов.

2. Реалізувати систему гарантуючого керування (СГК), тобто, так САК, яка поряд із функціями регулювання та захисту, реалізувала б функцію гарантованого дотримання встановлених обмежень з заданою ймовірністю.

Концепція побудови таких систем полягає у безперервному оцінюванні (на ковзному інтервалі часу) поточного значення ймовірності відсутності порушення та такого коригування режиму роботи об'єкта, щоб ця ймовірність відповідала наперед заданій ймовірності. Безпосередньо вимірювати значення цієї ймовірності неможливо, тому необхідна розробка спеціальної моделі, яка дозволить за оцінками доступних для вимірювання змінних отримати необхідну оцінку. Таку модель можна назвати моделлю порушення регламенту (МНР).

Альтернативні варіанти МНР для оцінки поточної ймовірності виникнення події S представлені у формі виразів для розрахунку поточних значень оцінок середньої інтенсивності подій S . Вихідною інформацією цих розрахунків є результати оцінювання ймовірнісних характеристик процесу $y(t)$ і значення $y^{rp\pm}$. Вигляд МНР залежить від прийнятої моделі зміни $y(t)$ і конкретно від виду прийнятої моделі зміни $m_y(t)$.

У нашому випадку приймаємо, що $m_y(t)$ є апіорі невідомою функцією часу.

Тоді розрахунок заданого допустимого значення $y^{зд\pm}$ вироблений безпосередньо за моделлю порушення регламенту буде здійснюватися за такою формулою:

$$y^{зд\pm}(t) = y^{rp\pm} \mp \hat{\sigma}_y \left\| \sqrt{2 \ln \left| \frac{T \hat{\sigma}_y}{2 \pi \hat{\sigma}_y \ln P_s^r(y^{rp\pm}, T)} \right|} \exp \left\{ -\frac{\hat{m}_y^2(t)}{2 \hat{\sigma}_y^2} \mp \frac{\sqrt{2 \pi} \hat{m}_y(t)}{\hat{\sigma}_y} \Phi \left(\frac{\hat{m}_y(t)}{\hat{\sigma}_y} \right) \right\} \right\|,$$

$$\Phi(\dots) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp \left\{ -\frac{1}{2} z^2 \right\} dz, \quad \Phi'(\dots) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{1}{2} z^2 \right)$$

Де - інтеграл

вірогідності та його похідна;

$\hat{m}_y, \hat{\sigma}_y, \hat{\sigma}_{\dot{y}}, \hat{A}_y, \hat{\omega}_y$ - оцінки відповідних характеристик випадкових процесів, обчислювані на ковзному інтервалі часу $T_{\text{кст}}$;

$\hat{m}_y(t), \hat{m}_{\dot{y}}(t)$ - оцінки математичного очікування, що змінюється, і його першої похідної, що обчислюються на ковзному інтервалі часу $T_m < T_{\text{кст}}$.

Оцінки характеристик випадкових процесів, обчислювані в реальному часі на ковзних інтервалах, визначаються усередненням на $T_{\text{кст}}$ (або на $T_m \ll T_{\text{кст}}$ для $m(t)$). При усередненні з рівномірним зважуванням реалізуються такі вирази:

$$\begin{aligned} \hat{m}_y &= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} y(t) dt, \quad \hat{m}_{\dot{y}} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \dot{y}(t) dt, \quad \hat{m}_y(t) = \frac{1}{T_m} \int_t^{t+T_m} y(t) dt, \quad \hat{m}_{\dot{y}}(t) = \frac{1}{T_m} \int_t^{t+T_m} \dot{y}(t) dt; \\ \hat{\sigma}_y &= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (y(t) - \hat{m}_y)^2 dt, \quad \hat{\sigma}_{\dot{y}} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (\dot{y}(t) - \hat{m}_{\dot{y}})^2 dt, \\ \hat{\mu}_y^4 &= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (y(t) - \hat{m}_y)^4 dt, \quad \hat{\mu}_{\dot{y}}^4 = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (\dot{y}(t) - \hat{m}_{\dot{y}})^4 dt. \end{aligned}$$

Структурна схема СГК з розрахунком допустимого заданого значення контуру регулювання безпосередньо за моделлю порушення регламенту представлена на рис. 4.1.

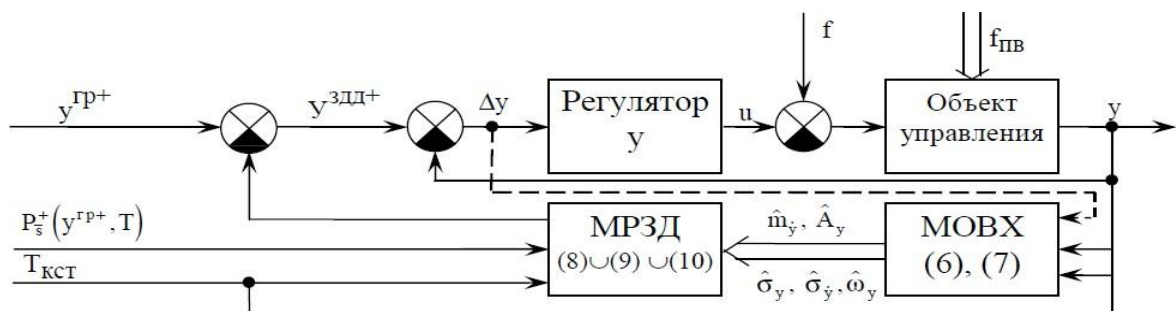


Рис. 4.1 – Структурна схема СГК з розрахунком допустимого заданого значення контуру регулювання безпосередньо за моделлю порушення регламенту (МРЗД – модуль розрахунку допустимого заданого значення; МОВХ – модуль оцінки ймовірнісних характеристик)

Сигнал від помилки регулювання та поточний стан змінної надходить на вхід МОВХ, куди також надходить $T_{\text{кст}}$ - мінімальний

інтервал часу, де виконуються умови квазістаціонарних $y^0(t)$. У МОВХ йде оцінка складових центрованого випадкового процесу (середньоквадратичне відхилення поточної змінної, середньоквадратичне відхилення її похідної, частота та амплітуда випадкової складової, а також математичне очікування похідної від поточної змінної). Далі вище зазначені змінні надходять на вхід МРЗД куди також надходить $T_{\text{кст}}$, і $P_s(y^{\text{гр}}, T)$ -імовірність відсутності події S , де формується таке значення, що після відрахування з граничним значенням в $y^{\text{гр}}$ було таке значення $y^{\text{здл}+}$, яке разом із контуром регулювання забезпечувало роботу нашої САК з наперед заданою ймовірністю безаварійності.

4.2 Розробка структурної схеми САК та опис принципу її дії.

На основі базової САР розроблена структура модернізованої САК, що передбачає керування процесом витoku зерна з підвагового бункера. Структурна схема САК представлена на рис. 4.2.

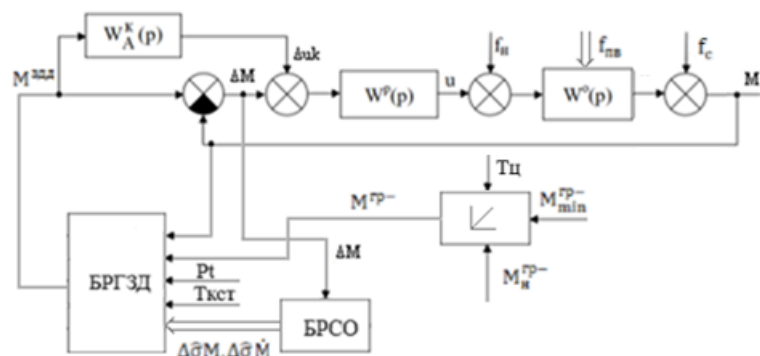


Рис. 4.2 – Структурна схема модернізованої системи керування яка додатково реалізує функцію гарантуючого керування витoku зерна з підвагового бункера (БРГЗД – блок розрахунку гарантуючого заданого значення; БРСО – блок розрахунку статистичних оцінок)

Позначення на схемі:

M – регульована змінна (маса);

ΔM – помилка регулювання;

$W^p(p)$ – передаточна функція регулятора;

$W^o(p)$ – передаточна функція ОК;

Δu_k – коригуюча керуюча дія;

u – керуюча дія;

$f_{пв}$ – параметричні збурення;

f_n – неконтрольоване збурення;

f_c – координатне неконтрольоване збурення;

$M^{здд}$ – задане допустиме значення регульованої змінної;

$M^{гр-}$ – обмеження регламенту регульованої змінної (граничне значення M) ;

$M_{min}^{гр-}$ – мінімальне значення $M^{гр-}$;

$M_n^{гр-}$ – початкове значення $M^{гр-}$ (на момент нового циклу зсипання зерна в бункер);

$\hat{\sigma}\Delta M, \hat{\sigma}\Delta \dot{M}$ – оцінки середньоквадратичного відхилення похибки регулювання та похідної похибки регулювання;

P_t – задане значення ймовірності відсутності порушення обмеження $M^{гр-}$;

$T_{кст}$ – мінімальний інтервал часу для умови квазістационарності;

$T_{ц}$ - час циклу розвантаження підвагового бункера;



– Інтегратор



Починає інтегрувати від $M_n^{гр-}$ зменшуючи до $M_{min}^{гр-}$ за час циклу (150 с).

У представлений системі передбачено регулювання маси у підваговому бункері. Система стабілізує масу на заданому значенні. Регулятор маси отримує задане значення від блоку БРГЗД алгоритма гарантуючого керування. Алгоритм гарантуючого керування

реалізований двома блоками: БРСО та БРГЗД.

У блоці БРСО на кожному інтервалі часу розраховуються оцінка середньоквадратичного відхилення помилки регулювання маси та оцінка середньоквадратичного відхилення похідної помилки регулювання маси відповідно до формул, наведених у пункті 2.1. Ковзний інтервал часу задається як параметр налаштування системи. У блоці БРГЗД безпосередньо з урахуванням моделі порушення регламенту виконується розрахунок гранично допустимого заданого значення маси (п. 2.1). Розрахунок виконується на основі: граничного значення маси – $M^{гр-}$; заданого значення ймовірності відсутності порушення обмеження – P_t ; заданого значення інтервалу часу, на якому гарантується відсутність порушення обмеження; поточних значень оцінок ймовірнісних характеристик розрахованих у блоці БРСО та поточного значення маси. При реалізації алгоритму гарантування використовувались такі налаштування : гарантована вірогідність дотримання обмежень $P_t=0,9$ на інтервалі часу $T = 10$ сек, інтервал квазістаціонарності $T_{кст} = 10$ сек.

4.3 Доопрацювання математичної моделі ОР для вирішення задачі синтезу та аналізу системи гарантуючого керування.

Для виконання завдання синтезу та аналізу роботи системи гарантуючого керування доповнимо модель об'єкта керування моделями параметричних збурень (зміна запізнення і постійної часу в каналі регулювання маси) та реалізації циклічного виконання процесу.

Повна схема моделювання об'єкта регулювання представлена на рис. 4.3. Параметричні збурення реалізовуватимемо на основі гармонійного сигналу.

Періоди гармонійних сигналів будуть різними, це необхідно для того аби провести моделювання при різних варіаціях параметрів об'єкта.

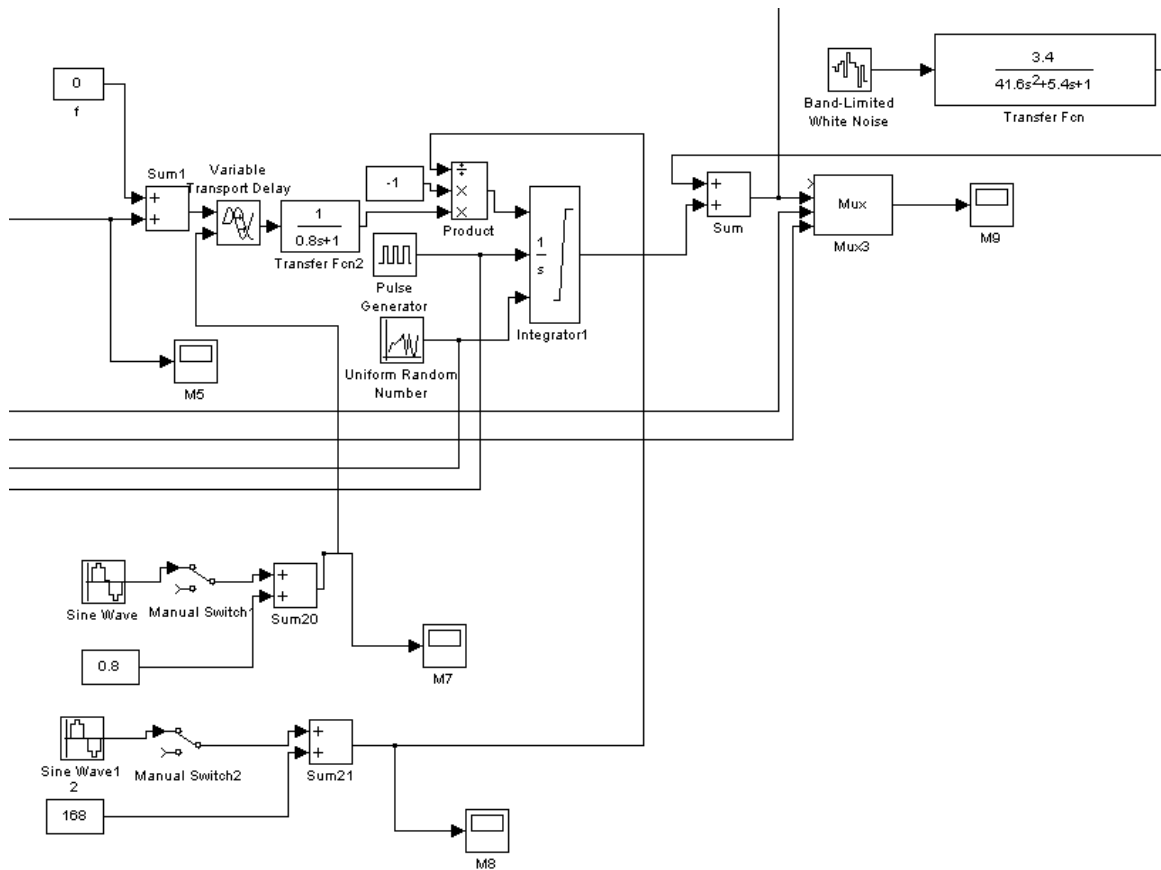


Рис. 4.3 – Схема моделювання об'єкта керування

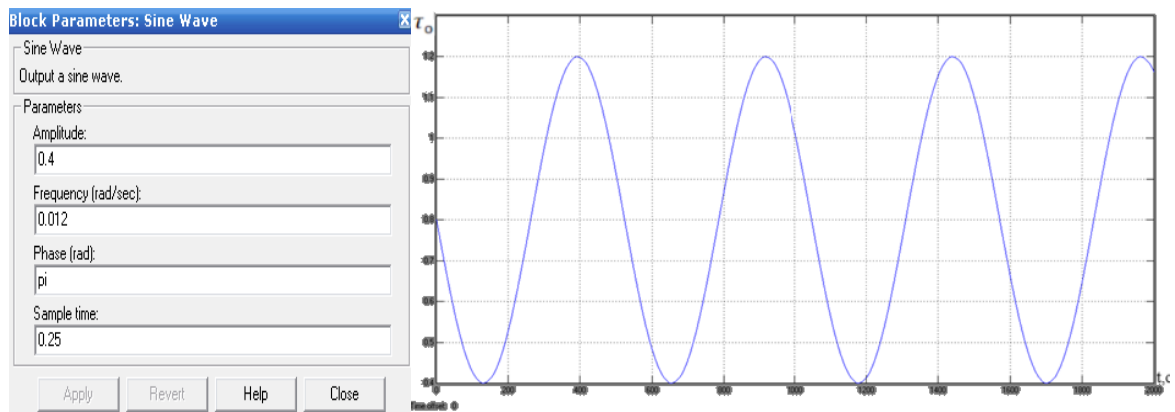


Рис. 4.4 – Графік, що відображає характер зміни часу запізнення у каналі регулювання маси та його налаштування

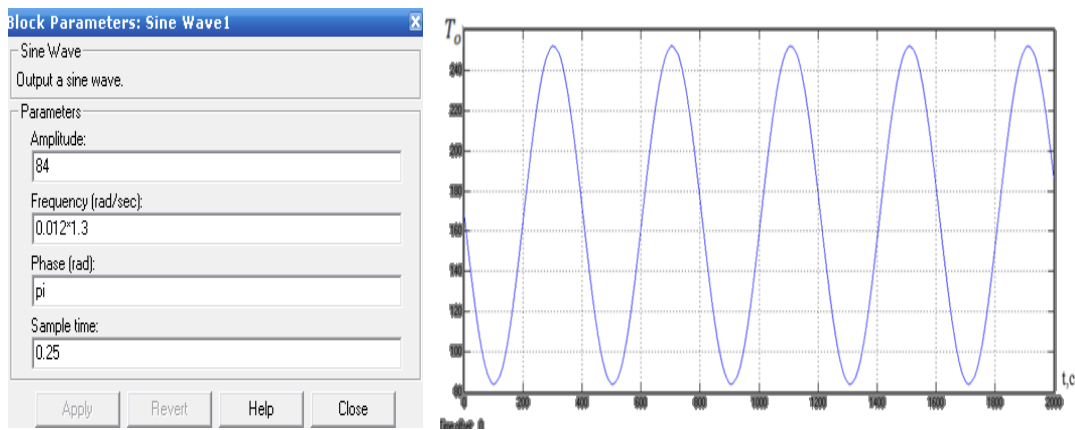


Рис. 4.5 – Графік, що відображає характер зміни постійної часу у каналі регулювання маси та його налаштування

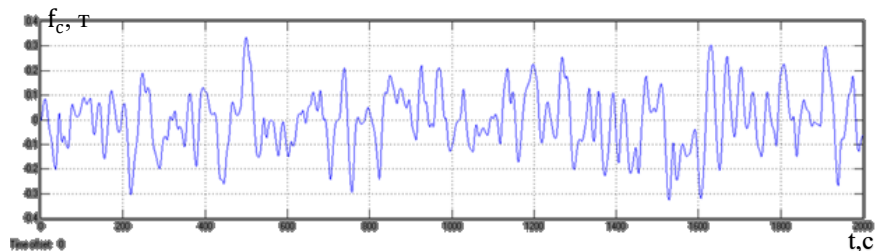


Рис. 4.6 – Графік, що відбиває характер зміни координатних неконтрольованих збурень

4.4 Розробка імітаційної моделі системи гарантуючого керування процесу витоку зерна з підвагового бункера та дослідження її роботи.

Доповнимо схему моделювання функціональними блоками, що реалізують алгоритми гарантуючого керування і проведемо налаштування їх параметрів.

Отримана схема моделювання представлена на рис. 4.7.

А схеми внутрішніх структур блоків BRGZD та BRSO представлені на рис. 4.8 та 4.9.

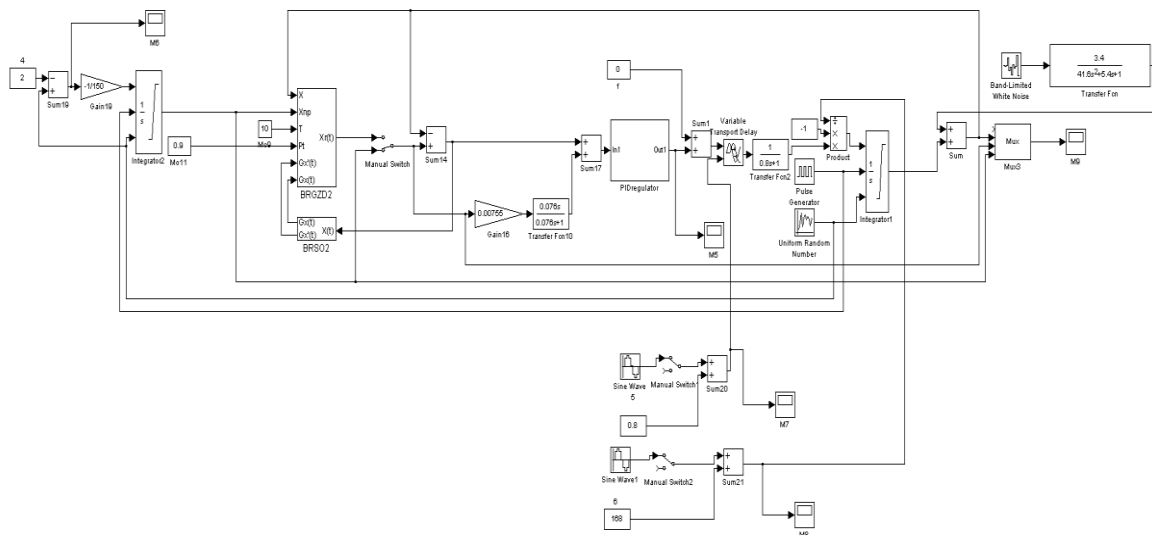


Рис. 4.7 – Схема моделювання САР з алгоритмом гарантуючого керування процесом витoku зерна з підвагового бункера

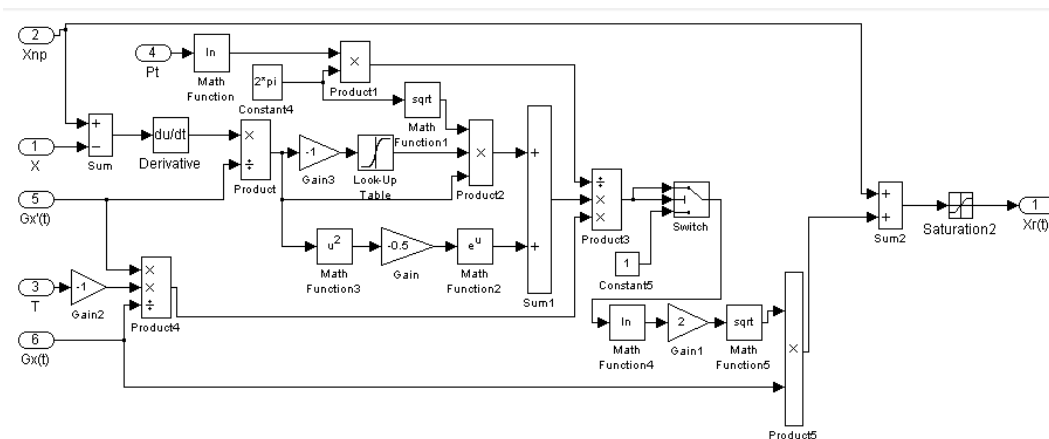


Рис. 4.8 – Внутрішня структура блоку BRGZD

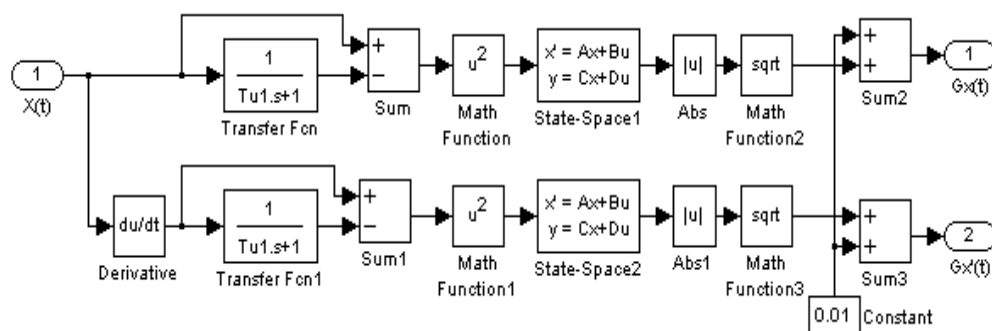


Рис. 4.9 – Внутрішня структура блоку BRSO

На рис. 4.10 та 4.11 представлені результати моделювання стабілізуючої САР процесу витоку зерна з підвагового бункера та системи, що реалізує гарантуюче керування при дії координатних неконтрольованих збурень.

Задане значення маси у підваговому бункері встановлено на рівні 8т, а граничне на рівні 2 т. Як видно з результатів моделювання в СГК викиди за граничне значення відсутні. Середнє видалення менше в системі, що реалізує гарантуюче керування.

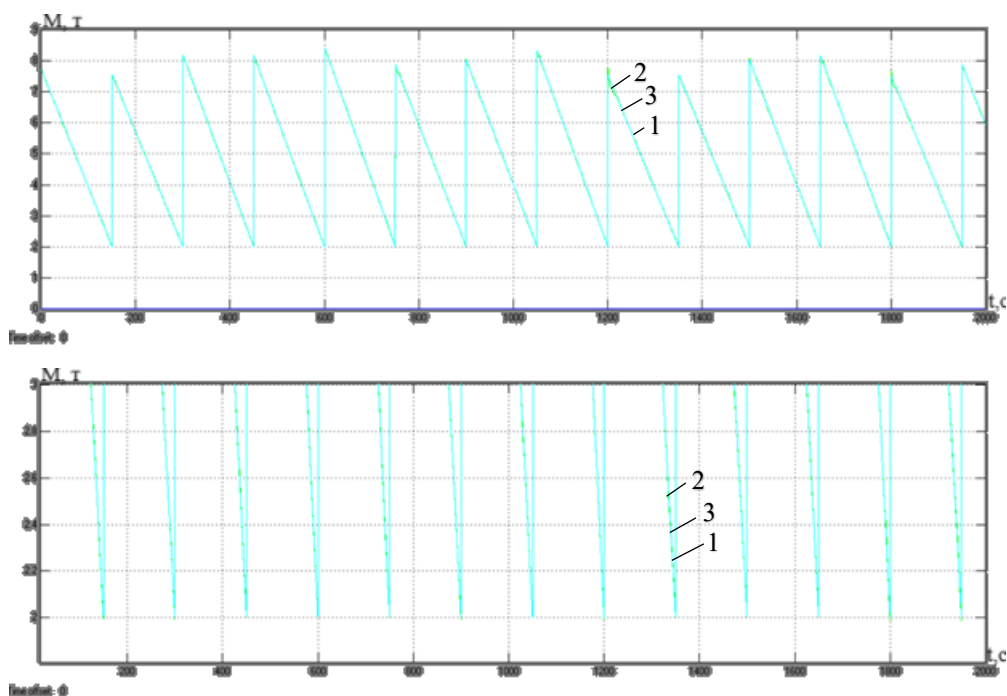


Рис. 4.10 – Результати моделювання стабілізуючої САР: 1 – закон зміни маси у підваговому бункері; 2 – регульована змінна (фактичне значення змінної маси); 3 – задане значення регульованної змінної (стабілізуюча САР)

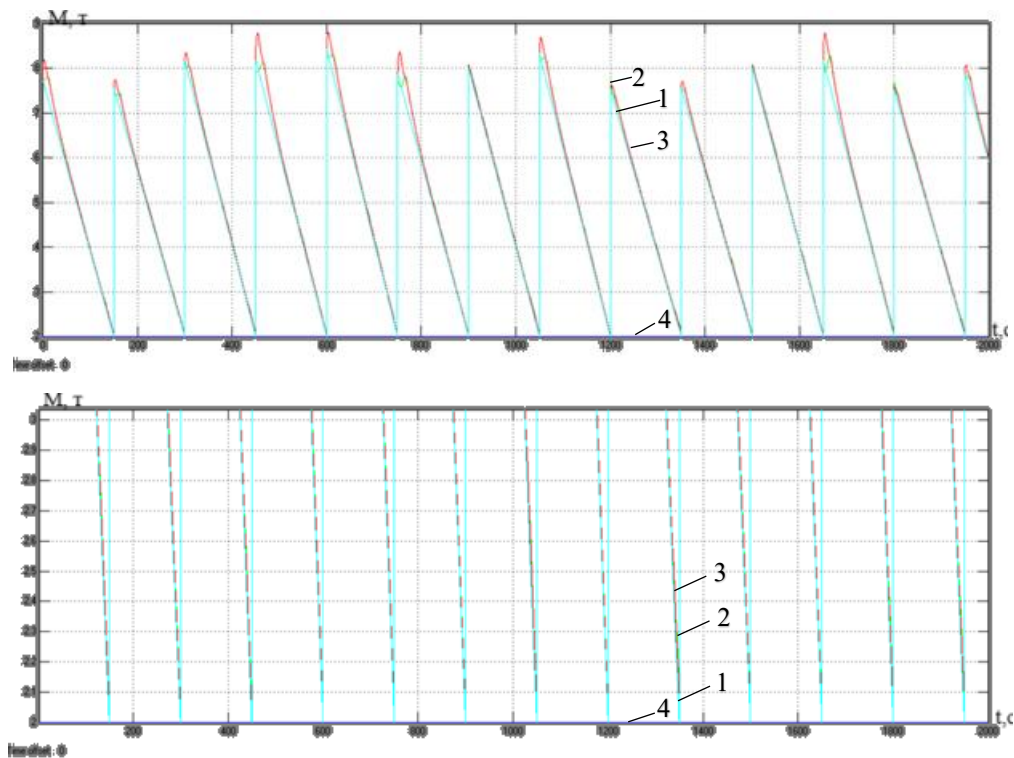


Рис. 4.11 – Результати моделювання системи, що реалізує гарантуюче керування: 1 – закон зміни маси у підваговому бункері; 2 – регульована змінна (фактичне значення змінної маси); 3 – задане допустиме значення регульованної змінної (завдання яке розрахувала гарантуюча система); 4 – гранично допустиме значення регульованної змінної

При моделюванні обох варіантів систем керування в умовах, зміни часу запізнення у каналі регулювання маси, робота стабілізуючої САР погіршується (рис. 4.12). Є викиди регульованої змінної за граничну межу 2 т.

Система, що реалізує гарантуюче керування залишається працездатною (рис. 4.13). А середнє видалення маси від граничного значення збільшується.

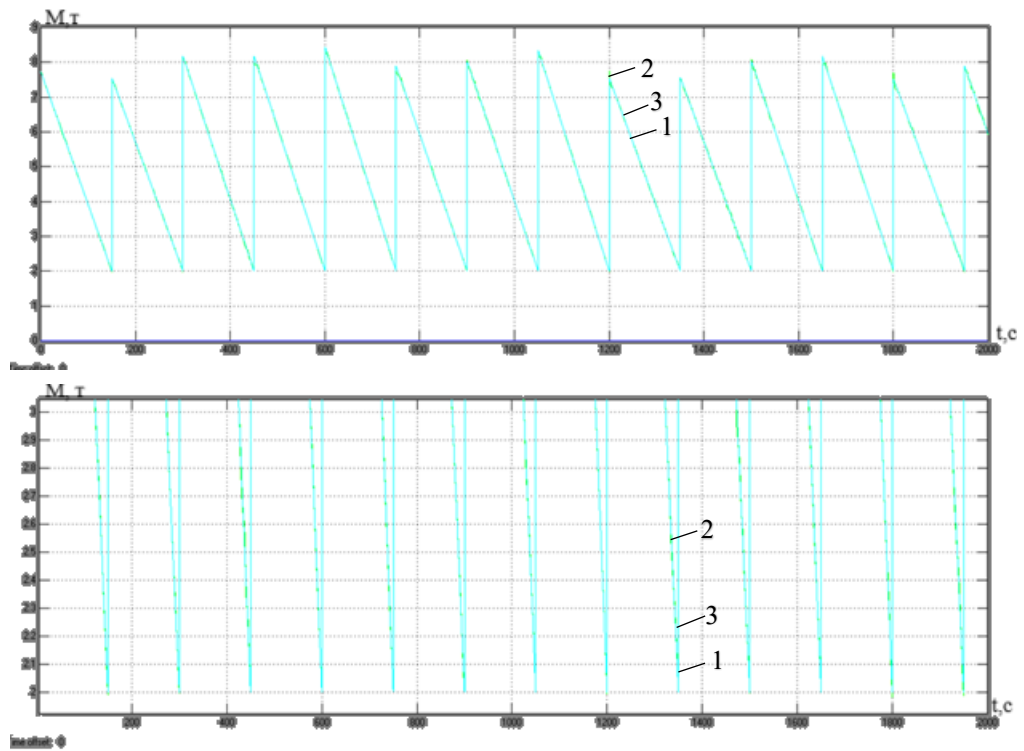


Рис. 4.12 – Результати моделювання стабілізуючої САР: 1 – закон зміни маси у підваговому бункері; 2 – регульована змінна (фактичне значення змінної маси); 3 – задане значення регульованої змінної (стабілізуюча САР)

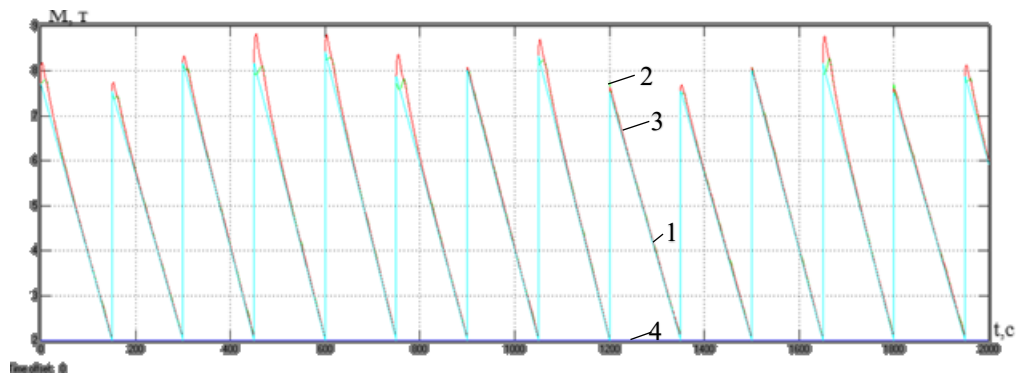


Рис. 4.13 – Результати моделювання системи, що реалізує гарантуюче керування: 1 – закон зміни маси у підваговому бункері; 2 – регульована змінна (фактичне значення змінної маси); 3 – задане допустиме значення регульованої змінної (завдання яке розраховувала гарантуюча система); 4 – гранично допустиме значення регульованої змінної

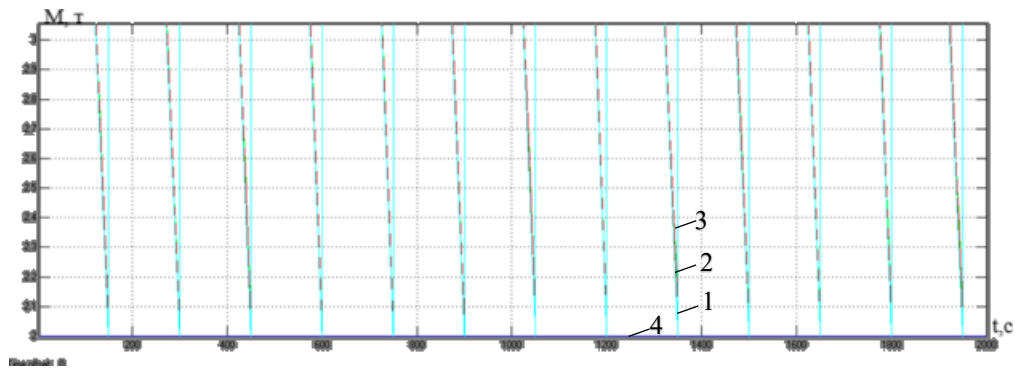


Рис. 4.13 (закінчення) – Результати моделювання системи, що реалізує гарантующе керування: 1 – закон зміни маси у підваговому бункері; 2 – регульована змінна (фактичне значення змінної маси); 3 – задане допустиме значення регульованної змінної (завдання яке розраховувала гарантуюча система); 4 – гранично допустиме значення регульованної змінної

При моделюванні обох варіантів систем керування в умовах, при зміні постійної часу у каналі регулювання маси, робота стабілізуючої САР погіршується (рис. 4.14).

Є певна кількість викидів регульованої змінної за граничну межу 2 т. Система стає нестійкою. Система, що реалізує гарантующе керування залишається працездатною (рис. 4.15).

Виходів за граничне значення немає, але середнє віддалення від граничного значення збільшується незначно.

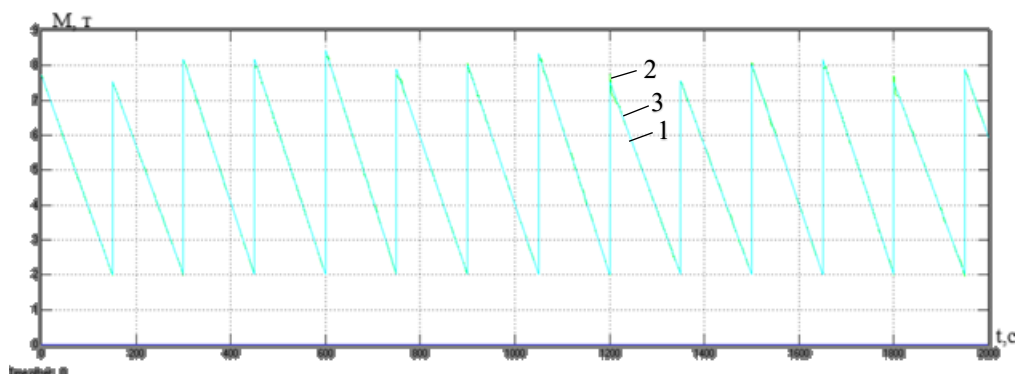


Рис. 4.14 – Результати моделювання стабілізуючої САР: 1 – закон зміни маси у підваговому бункері; 2 – регульована змінна (фактичне значення змінної маси); 3 – задане значення регульованної змінної (стабілізуюча САР)

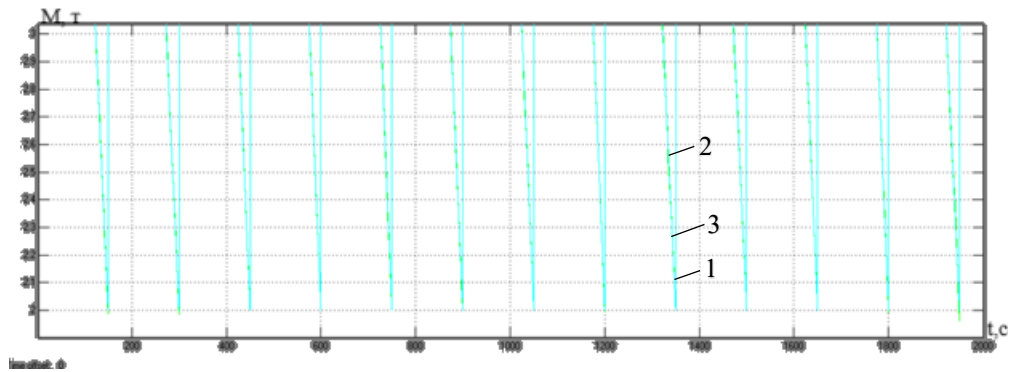


Рис. 4.14 – Результати моделювання стабілізуючої CAP: 1 – закон зміни маси у підваговому бункері; 2 – регульована змінна (фактичне значення змінної маси); 3 – задане значення регульованної змінної (стабілізуюча CAP)

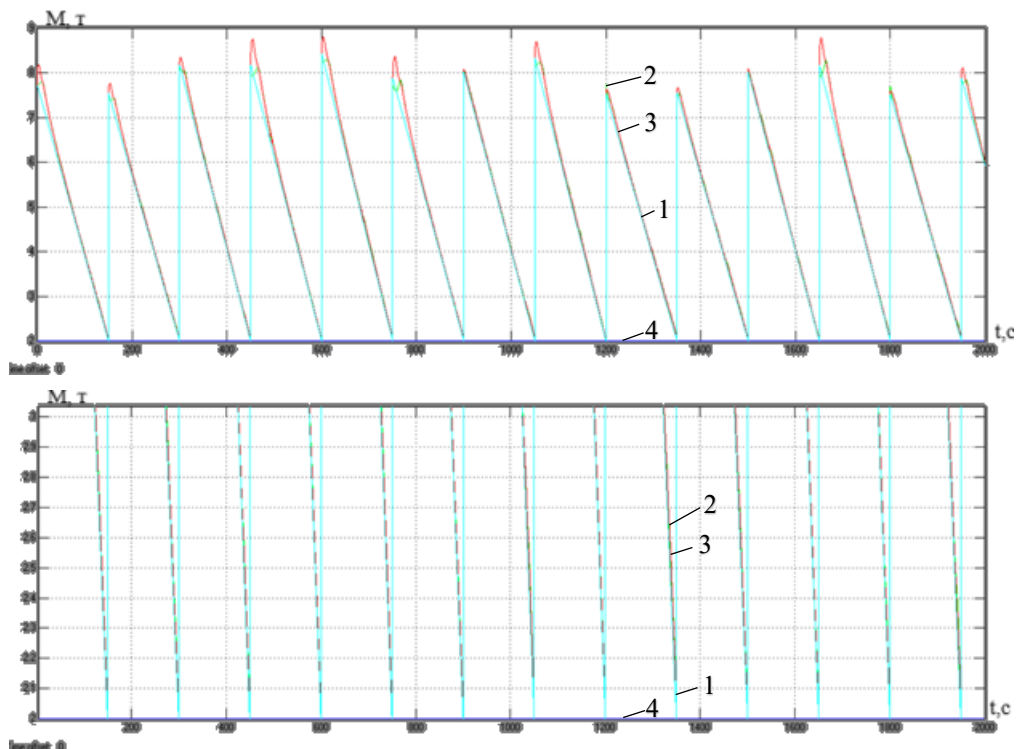


Рис. 4.15 – Результати моделювання системи, що реалізує гарантующе керування: 1 – закон зміни маси у підваговому бункері; 2 – регульована змінна (фактичне значення змінної маси); 3 – задане допустиме значення регульованної змінної (завдання яке розрахувала гарантуюча система); 4 – гранично допустиме значення регульованної змінної

Результати моделювання обох варіантів систем керування в умовах, коли діють параметричні збурення та при дії координатних неконтрольованих збурень. Робота стабілізуючої САР погіршується (рис. 4.16).

СГК залишається працездатною та середнє видалення маси від нижньої межі залишається менше, ніж у стабілізуючій САР, без вихідів за гранично припустиме значення маси у підваговому бункері.

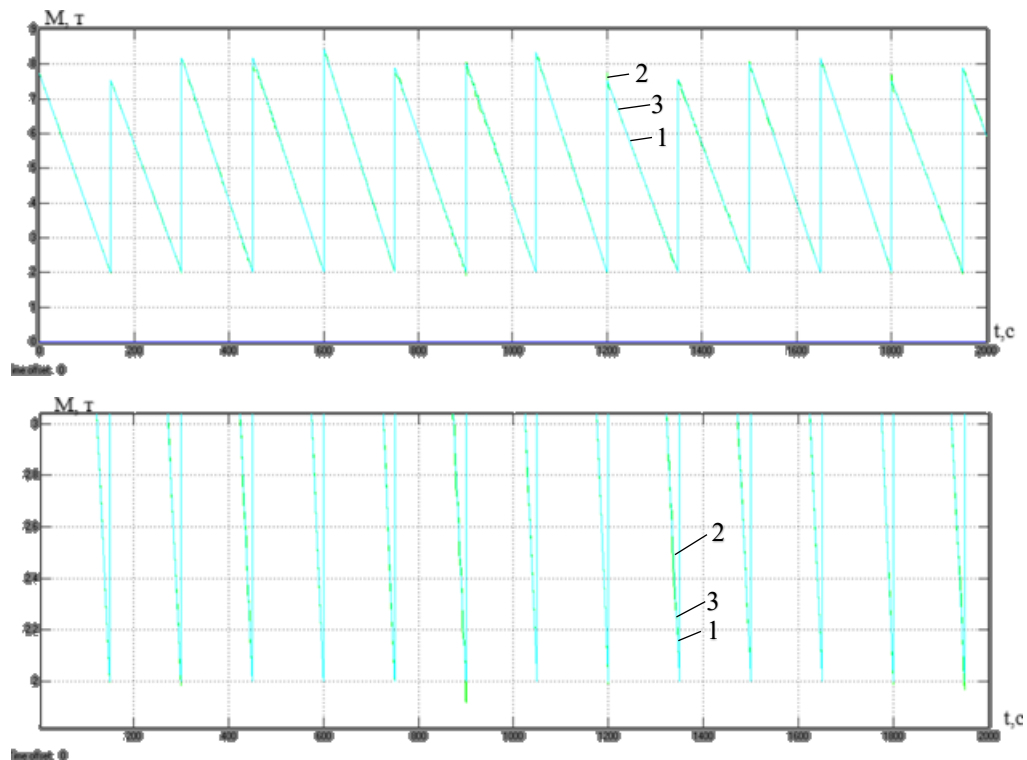


Рис. 4.16 – Результати моделювання стабілізуючої САР: 1 – закон зміни маси у підваговому бункері; 2 – регульована змінна (фактичне значення змінної маси); 3 – задане значення регульованої змінної (стабілізуюча САР)

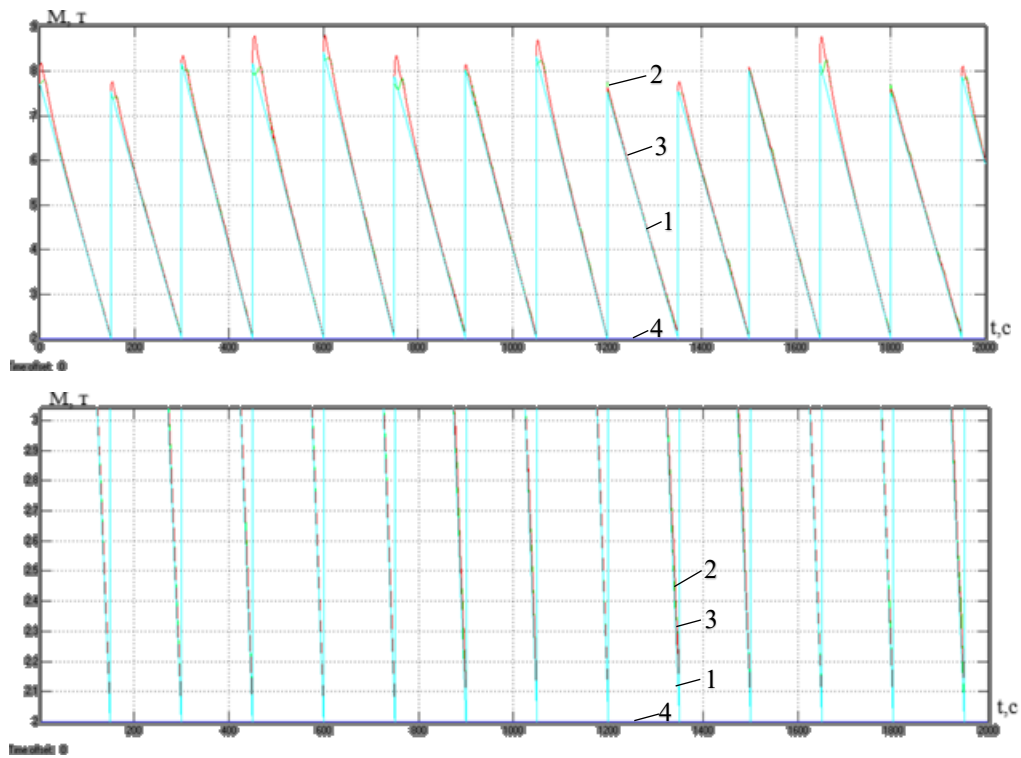


Рис. 4.17 – Результати моделювання системи, що реалізує гарантуюче керування: 1 – закон зміни маси у підваговому бункері; 2 – регульована змінна (фактичне значення змінної маси); 3 – задане значення регульованної змінної (стабілізуюча САР), задане допустиме значення регульованної змінної (завдання яке розраховувала гарантуюча система); 4 – гранично допустиме значення регульованної змінної

За результатами проведених досліджень можна дійти висновку, що система, яка реалізує гарантуюче керування масою у підваговому бункері при дії параметричних збурень (в умовах зміни часу запізнення у каналі регулювання маси і зміні постійної часу у каналі регулювання маси) та при дії координатних неконтрольованих збурень забезпечує виконання процесу витоку зерна з підвагового бункера, підтримує масу максимально близько до нижньої межі регламенту, забезпечуючи безаварійну роботу. Стабілізуючі САР для вирішення такого завдання не підходять.

Розглянемо вплив значення ймовірності відсутності порушення регламенту на якість роботи системи гарантуючого керування. Проведемо моделювання системи за різних значень ймовірності безаварійного режиму роботи ($P_t = [0.9, 0.99, 0.999]$).

При значенні ймовірності $P_t = 0.9$ проводилися попередні дослідження, тому проведемо моделювання системи гарантуючого керування при значеннях ймовірності $P_t = 0.99$ і $P_t = 0.999$.

Результати моделювання подано на рис. 4.18 та 4.19.

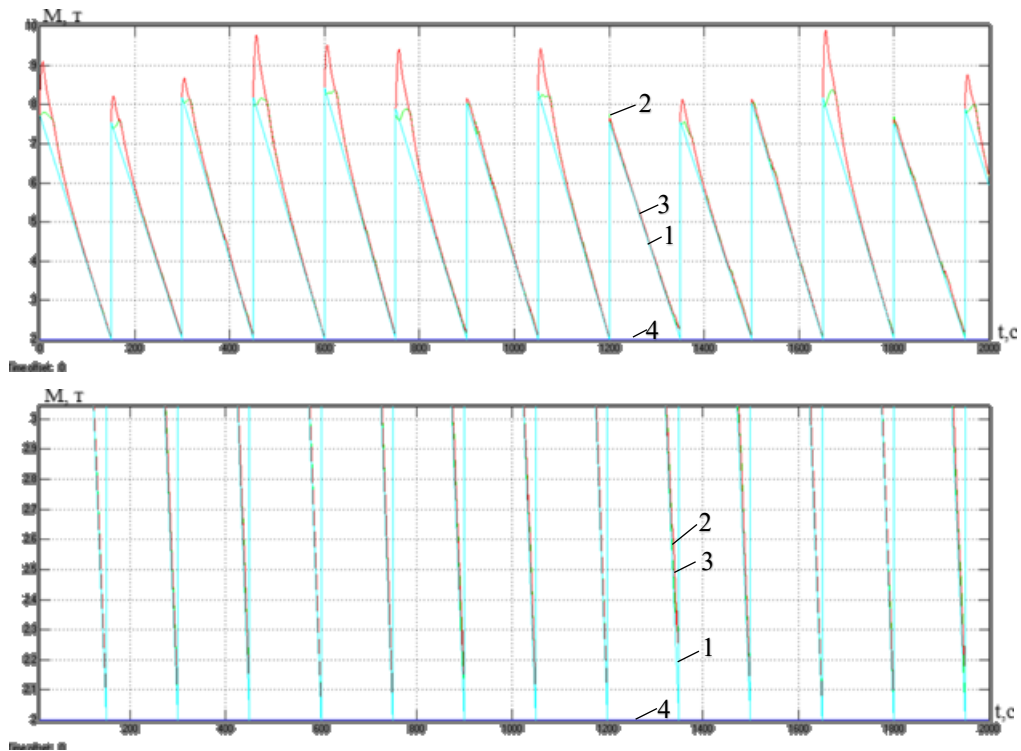


Рис. 4.18 – Результати моделювання системи, що реалізує гарантуюче керування процесом витоку зерна з підвагового бункера при $P_t = 0.99$:

- 1 – закон зміни маси у підваговому бункері; 2 – регульована змінна (фактичне значення змінної маси); 3 – задане допустиме значення регульованної змінної (завдання яке розраховувала гарантуюча система);
- 4 – гранично допустиме значення регульованної змінної

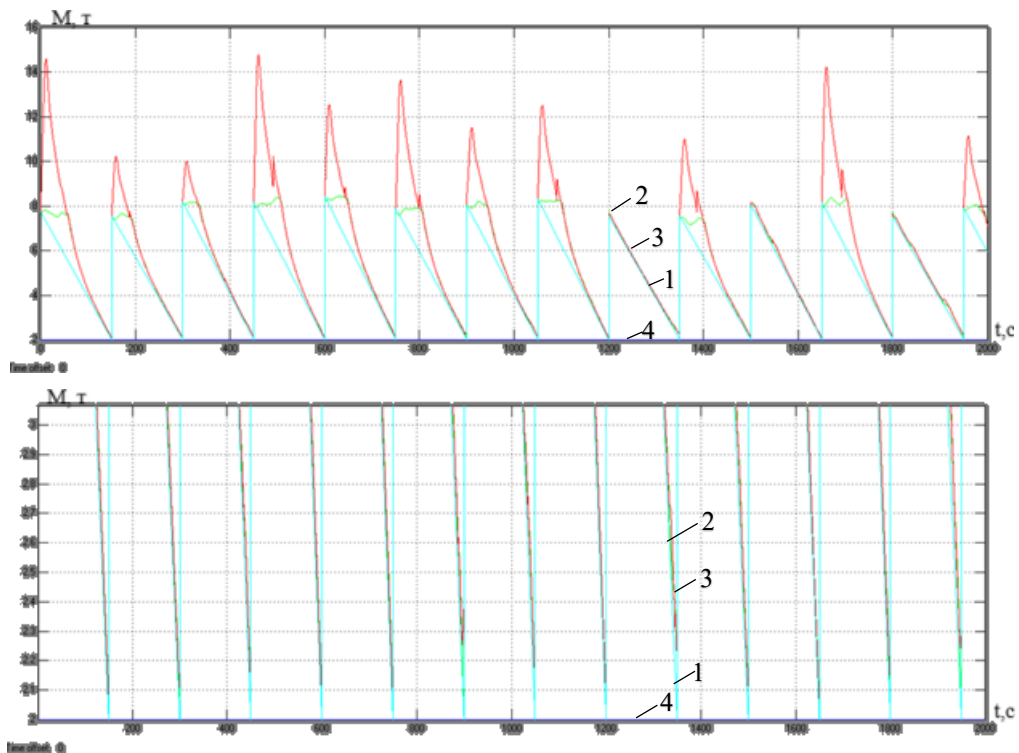


Рис. 4.19 – Результати моделювання системи, що реалізує гарантуюче керування процесом витоку зерна з підвагового бункера при $P_t = 0.999$:

1 – закон зміни маси у підваговому бункері; 2 – регульована змінна (фактичне значення змінної маси); 3 – задане допустиме значення регульованої змінної (завдання яке розраховувала гарантуюча система); 4 – гранично допустиме значення регульованої змінної

За результатами можна дійти висновку, що більше значення P_t тим далі система відводить регульовану змінну від граничного значення. При зниженні значення P_t можуть з'явитися виходи за граничне значення маси у підваговому бункері.

4.5 Висновки за розділом 4

У 4 розділі роботи розроблено та досліджено модернізовану САК процесом витоку зерна з підвагового бункера. САК реалізує нову функцію: функцію гарантуючого керування процесом витоку зерна з підвагового бункера. Реалізація цієї функції забезпечує рівномірне розвантаження

бункера за рахунок підтримки маси поблизу нижньої межі регламенту без її порушення. Також система недопускає різкого обвалу зерна за рахунок реалізації функції гарантуючого керування маси у підваговому бункері.

У роботі проведено низку порівняльних аналізів САР базової структури та САК, що реалізує функцію гарантуючого керування.

За результатами проведених досліджень можна зробити висновок, що система гарантуючого керування при дії параметричних збурень забезпечує виконання процесу витоку зерна з підвагового бункера, підтримує масу у підваговому бункері максимально близько до нижньої межі регламенту, гарантуючи рівномірне розвантаження бункера та недопущення різкого обвалу зерна за рахунок реалізації цієї функції. Стабілізуючі САР для вирішення такого завдання не підходять.

За результатами також можна дійти висновку, що чим більше значення P_t тим далі система відводить регульовану змінну від граничного значення. У всіх експериментах САК, що реалізує функцію гарантуючого керування, є кращою, ніж САР базової структури, і подальше її використання є доцільним.

РОЗДІЛ 5. РЕАЛІЗАЦІЯ І ПІДГОТОВКА ДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ НА ПІДПРИЄМСТВІ

5.1 Існуюча програмно-технічна структура підсистеми автоматичного керування процесом витоку зерна з підвагового бункера до лінії завантаження суден і формулювання задач по її розвитку для впровадження розробок.

Існуюча система керування процесом витоку зерна з підвагового бункера реалізована на базі сучасних мікропроцесорних контролерів фірми WAGO. Для реалізації алгоритмів керування в модулях ПЗО контролера передбачено: аналогові входи (3); аналогові виходи (1); дискретні входи (14); дискретні виходи (8).

Список параметрів які повинні вводитись і виводитись з контролера наведено у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Список параметрів які вводяться і виводяться із контролера

№ пп	Назва параметра	Умове позначен ня	Вид сигнал у A/D	Тип сигнал у I/O	Діапазон сигналу на вході/виході контролера	Позна чення на схемі
1	Маса вагового бункера	W_b1	A	I	(0-20 мА)	AI1
2	Маса витратного бункера	W_b2	A	I	(0-20 мА)	AI2
3	Положення засувки витратного бункера	GE1	A	I	(0-20 мА)	AI3
4	Керуюча дія ступінь відкриття засувки витратного бункера	U_1	A	O	(0-20 мА)	AO1
5	Сигнал датчика контролю верхнього рівня зерна у приймальному бункері	L_z1	D	I	24 V DC	DI1

Таблиця 5.1 (продовження) – Список параметрів які вводяться і виводяться
із контролера

№ пп	Назва параметра	Умовне позначен ня	Вид сигнал у A/D	Тип сигнал у I/O	Діапазон сигналу на вході/виході контролера	Позна чення на схемі
6	Сигнал датчика контролю верхнього рівня зерна у витратному бункері	L_z2	D	I	24 V DC	DI2
7	Сигнал датчика контролю тиску повітря у пневмомережі	P_v1	D	I	24 V DC	DI3
8	Сигнал датчика контролю закриття засувки у приймальному бункері	GSpb1	D	I	24 V DC	DI4
9	Сигнал датчика контролю відкриття засувки у приймальному бункері	GSpb2	D	I	24 V DC	DI5
10	Сигнал датчика контролю закриття засувки у ваговому бункері	GSvb1	D	I	24 V DC	DI6
11	Сигнал датчика контролю відкриття засувки у ваговому бункері	GSvb2	D	I	24 V DC	DI7
12	Сигнал керування засувкою ПЗ_1 вагового бункера	Z1_C	D	O	«відкритий колектор»	DO1
13	Сигнал керування засувкою ПЗ_2 витратного бункера	Z2_C	D	O	«відкритий колектор»	DO2
14	Сигнал керування двигуном транспортера M1	M1_C	D	O	«відкритий колектор»	DO3

Таблиця 5.1 (закінчення) – Список параметрів які вводяться і виводяться із контролера

№ пп	Назва параметра	Умовне позначен ня	Вид сигнал у А/D	Тип сигнал у I/O	Діапазон сигналу на вході/виході контролера	Позна чення на схемі
15	Сигнал с дод. контакта пускача двигуна M1	M1_KM	D	I	24 V DC	DI8
16	Сигнал керування двигуном норії M2	M2_C	D	O	«відкритий колектор»	DO4
17	Сигнал с дод. контакта пускача двигуна M2	M2_KM	D	I	«сухий контакт»	DI9
18	Сигнал керування двигуном транспортера M3	M3_C	D	O	«відкритий колектор»	DO5
19	Сигнал с дод. контакта пускача двигуна M3	M3_KM	D	I	24 V DC	DI10
20	Сигнал керування двигуном сепаратора M4	M4_C	D	O	«відкритий колектор»	DO6
21	Сигнал с дод. контакта пускача двигуна M4	M4_KM	D	I	24 V DC	DI11
22	Сигнал керування двигуном транспортера M5	M5_C	D	O	«відкритий колектор»	DO7
23	Сигнал с дод. контакта пускача двигуна M5	M5_KM	D	I	24 V DC	DI12
24	Сигнал управління звук. сигнал.	HA	D	O	«відкритий колектор»	DO8
25	Сигнал кнопки авт. пуску	SB_pusk	D	I	«сухий контакт»	DI13
26	Сигнал кнопки авт. зупинки	SB_stop	D	I	«сухий контакт»	DI14

Технічну структуру системи керування розроблено на базі розподіленої системи WAGO I/O. Для реалізації алгоритмів керування використовується контролер WAGO 750-881 з модулями ПЗО: AI WAGO 750-453, AO WAGO 750-555, DI WAGO 750-430, DO WAGO 750-530. Загальний вид контролера та схема його підключення наведені на рис.5.1 та 5.2.

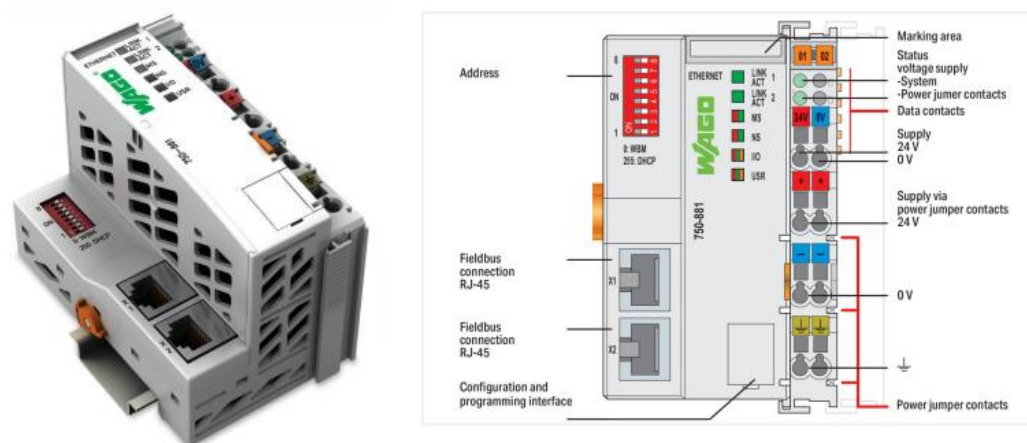


Рис. 5.1 – Контролер WAGO 750-881 – зовнішній вигляд

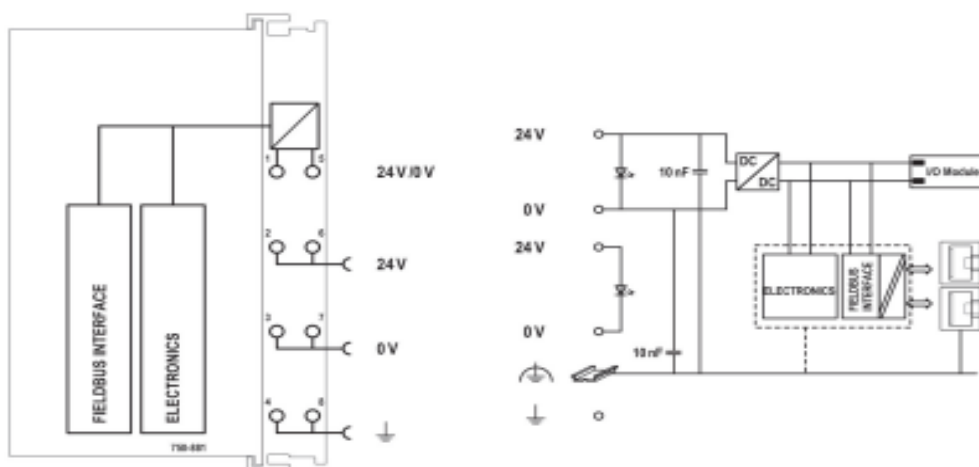
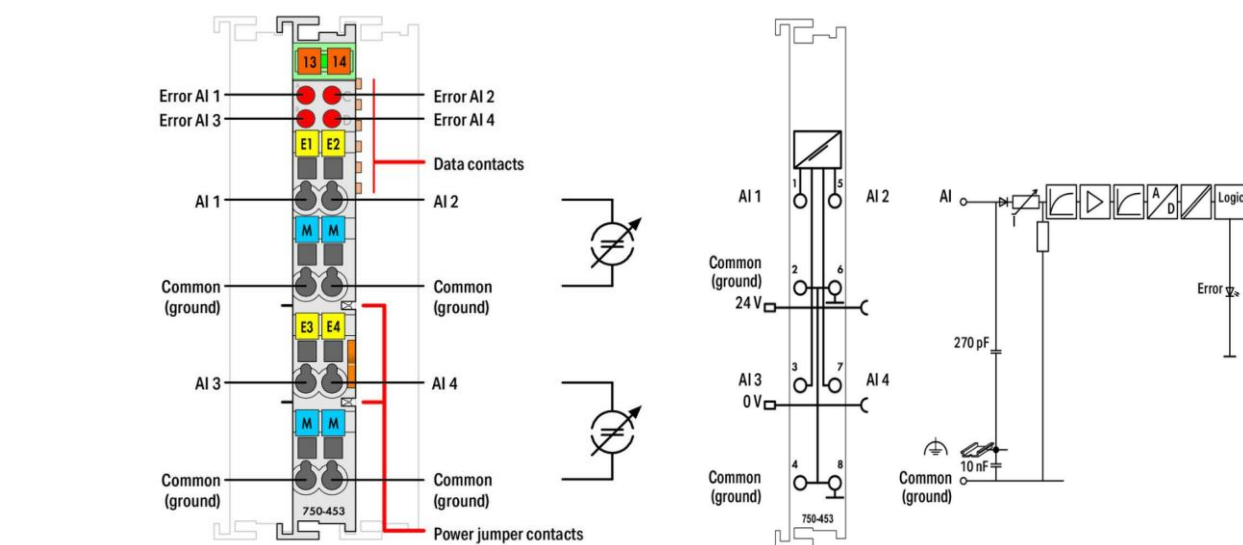


Рис. 5.2 – Схема підключення контролера WAGO 750-881

Центральний процесор WAGO 750-881 характеризується наступними показниками: 32-бітний мікропроцесор, програмна сумісність з WAGO-I/O-PRO V2.3 (based on CODESYS V2.3), годинник реального часу, вбудований носій інформації об'ємом 512 Мбайт, інтегрований Web-інтерфейс.

Для введення аналогових сигналів у контролер використовується 4-канальний модуль аналогового введення WAGO 750-453 (рис. 5.3).



Technical data	
Number of analog inputs	4
Total number of channels (module)	4
Signal type	Current
Signal type (current)	0 ... 20 mA DC
Sensor connection	4 x (2-wire)
Input voltage (max.)	32 V
Signal characteristics	Single-ended
Resolution [bit]	12 bits
Input resistance (max.)	100 Ω
Data width	4 x 16-bit data; 4 x 8-bit control/status (optional)
Conversion time (typ.)	10 ms
Measurement error (reference temperature)	25 °C
Measurement error, deviation (max.) from the upper-range value	0.1 %
Temperature error (max.) of the upper-range value	0.01 %/K
Supply voltage (system)	5 VDC; via data contacts
Current consumption (5 V system supply)	65 mA
Supply voltage (field)	24 VDC (-25 ... +30 %); via power jumper contacts (power supply via blade contact; transmission (field side supply voltage only) via spring contact)
Isolation	500 V system/field
Indicators	LED (A-D) red: Error AI 1 ... AI 4
Number of incoming power jumper contacts	2
Number of outgoing power jumper contacts	2
Current carrying capacity (power jumper contacts)	10 A

Рис. 5.3 – Загальний вигляд модуля ПЗО WAGO 750-453, його характеристики та схема підключення

Для виведення аналогових сигналів з контролеру (формування аналогових керуючих дій) використовується 4-канальний модуль аналогового виводу WAGO 750-555 (рис. 5.4).

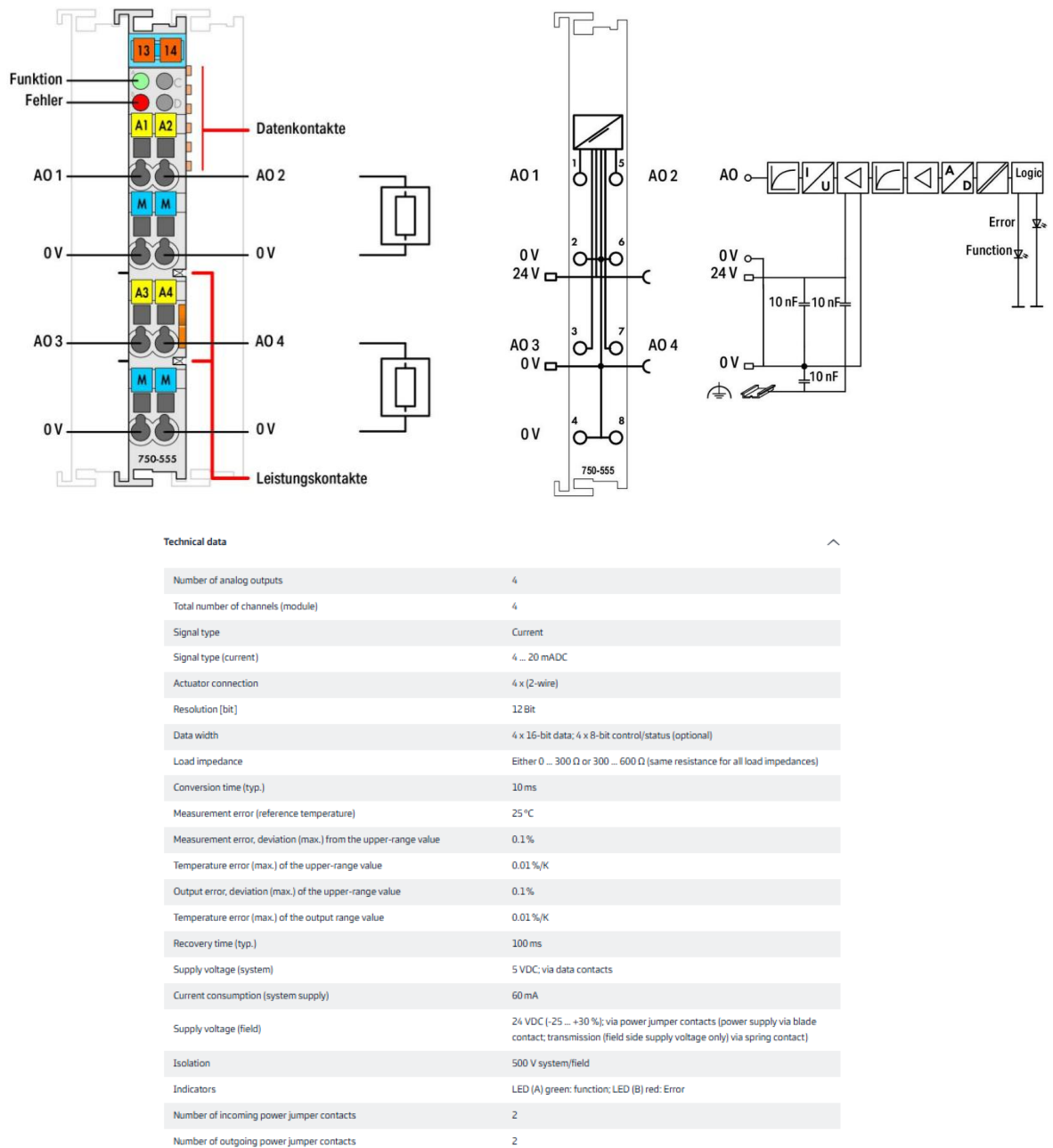


Рис. 5.4 – Загальний вигляд модуля ПЗО WAGO 750-555, його характеристики та схема підключення

Для вводу дискретних сигналів до контролеру використовується 8-канальний модуль дискретного вводу WAGO 750-430 (рис. 5.5).

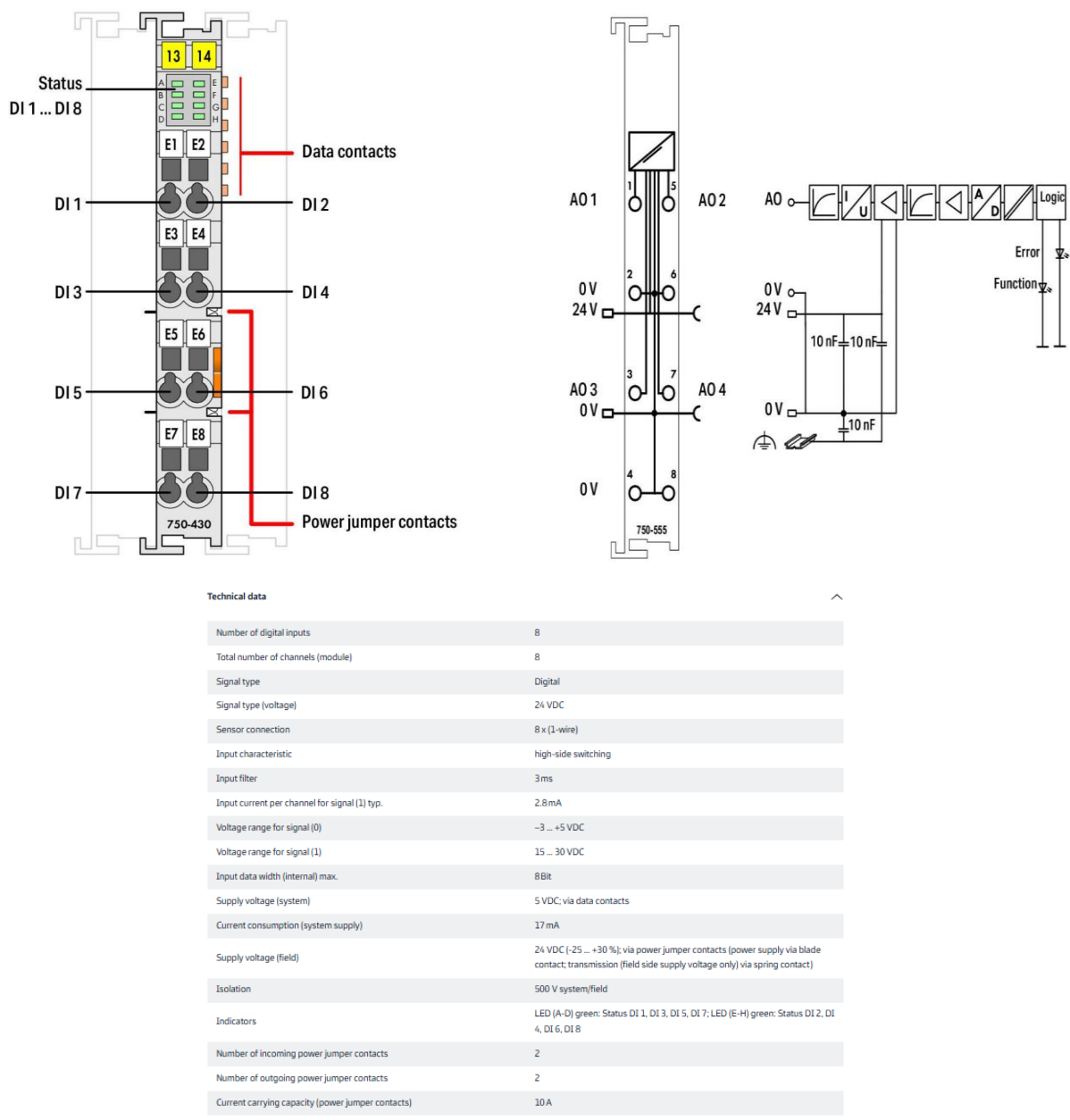


Рис. 5.5 – Загальний вигляд модуля ПЗО WAGO 750-430, його характеристики та схема підключення

Для виводу дискретних сигналів до контролеру використовується 8-канальний модуль дискретного виводу WAGO 750-530 (рис. 5.6).

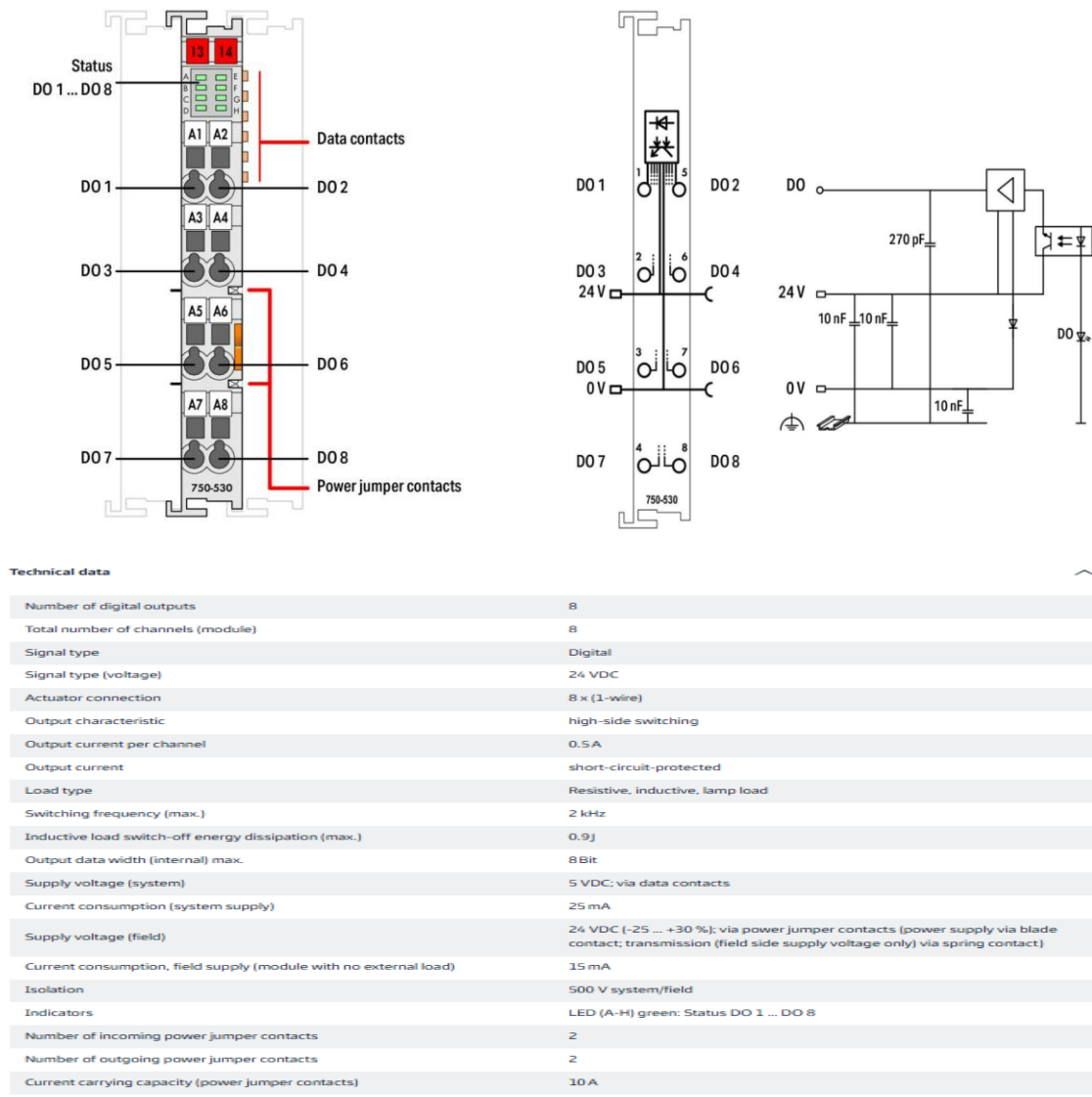


Рис. 5.6 – Загальний вигляд модуля ПЗО WAGO 750-530, його характеристики та схема підключення

Додатково використовуються модуль живлення 24В постійного струму WAGO 750-601 а також кінцевий модуль шини 750-600. Зв'язок контролера з комп'ютером здійснюється за допомогою інтерфейсу Ethernet.

Враховуючи обраний контролер, модулі ПЗО до нього, та список змінних, які необхідно вводити та виводити з контролера схема технічною структури мікропроцесорного ядра системи автоматичного керування має наступний вигляд. (рис. 5.7).

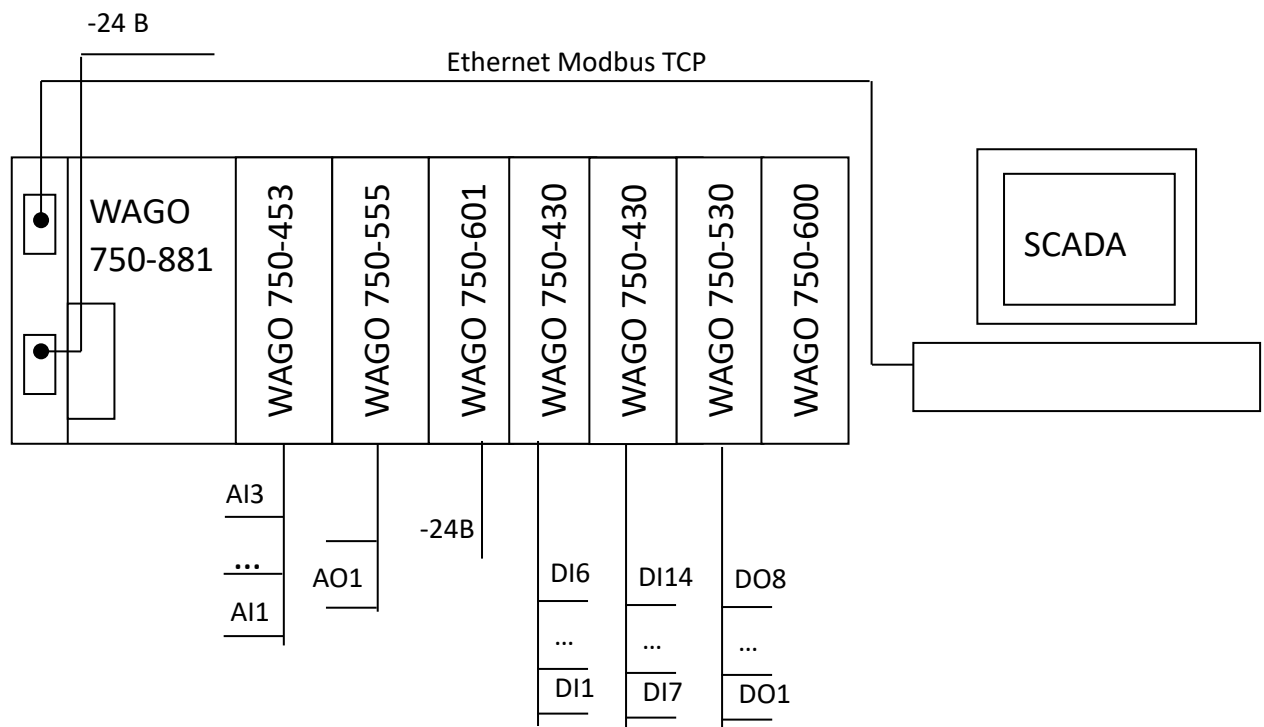


Рис. 5.7 – Схема технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування ділянкою ПТЛ завантаження суден

Існуюча система керування процесом витоку зерна з підвагового бункера яка реалізована на базі наведеної технічної структури доповнена функцією гарантуючого керування та алгоритмами регулювання які реалізовано на базі штучних нейронних мереж. Інтегрована функція гарантування та алгоритми штучних нейронних мереж не потребує істотного збільшення обчислюваних ресурсів, та реалізації додаткових каналів вводу виводу сигналів.

Тому технічну структуру системи керування змінювати не потрібно.

5.2 Розробка, налаштування і тестування прикладного програмного забезпечення для реалізації алгоритмів керування.

Прикладне програмне забезпечення, що реалізує розроблені алгоритми керування процесом витоку зерна з підвагового бункера до лінії завантаження суден може розроблятися безпосередньо у середовищі CodeSys v 2.3 з

використанням стандартних мов програмування контролерів. Для цього потрібно розроблені у системі Matlab алгоритми керування перевести у цифрову форму та вид придатний для програмування, а потім написати відповідний код. На кожному етапі реалізації можливі помилки і в загальній підхід потребує багато часу. Альтернативою цьому є варіант конвертації отриманих алгоритмів з системи Matlab у потрібну середу програмування контролерів. Такий підхід дозволяє отримати компактний перевірений код при малих затратах часу.

Для програмної реалізації розроблених алгоритмів керування процесом витоку зерна з підвагового бункера будемо використовувати пакет Simulink PLC Coder з його бібліотекою функціональних блоків PLCLib. Для цього з використанням блоків бібліотеки PLCLib проведемо цифрову реалізацію алгоритмів керування у моделі Simulink. Розглядати будемо реалізацію алгоритмів регулювання. Алгоритми оптимізації можуть реалізуватися окремими модулями. Отримана модель з алгоритмами підготовленими до конвертації наведена на рис. 5.8.

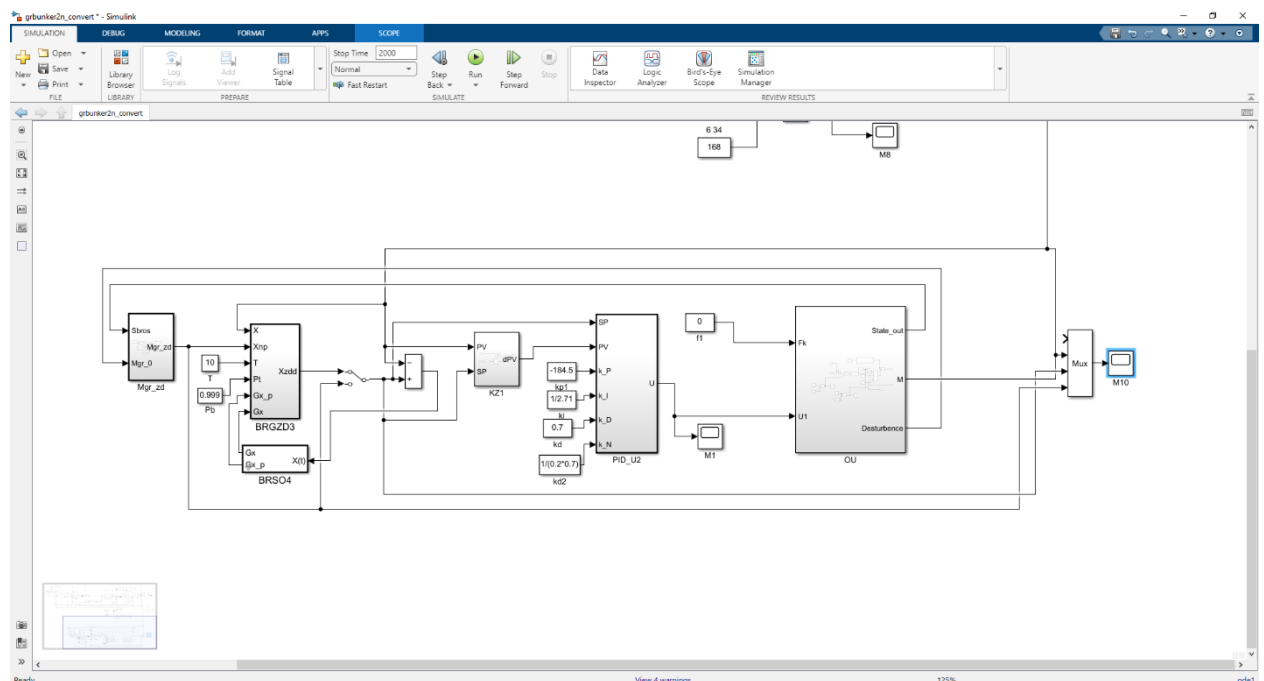


Рис. 5.8 – Схема моделювання САК процесом витоку зерна з підвагового бункера з цифровими алгоритмами керування, які підготовлені до конвертації

На рис. 5.9-5.11 наведена схема моделювання цифрового ПД регулятора та цифрової реалізації ланок задатчика та коригуючих зв'язків.

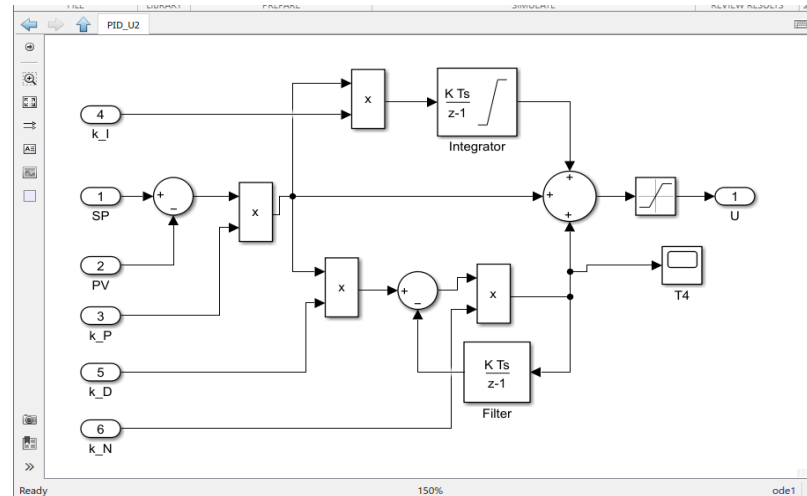


Рис. 5.9 – Схема цифрового ПД-регулятора

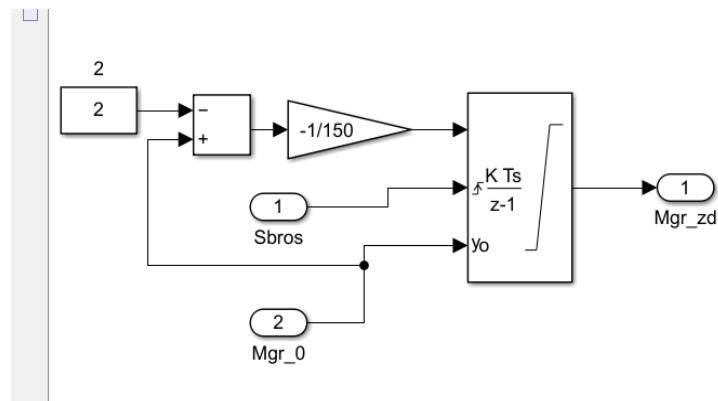


Рис. 5.10 – Схема моделювання цифрового варіанту задатчика граничного значення маси бункера (блок «KSz_12»)

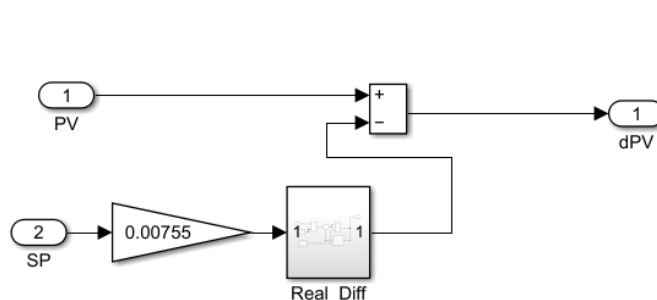


Рис. 5.11 – Схема моделювання цифрового варіанту коригуючого зв'язку (блок «KZ_1»)


```

Command Window

0.007782
-----
z - 0.9922

Sample time: 0.1 seconds
Discrete-time transfer function.

>> sys=tf([0.5 0],[12.8 1])

sys =

    0.5 s
-----
   12.8 s + 1

Continuous-time transfer function.

>> sysd=c2d(sys,0.1,'zoh')

sysd =

    0.03906 z - 0.03906
-----
           z - 0.9922

Sample time: 0.1 seconds
Discrete-time transfer function.

>> sys=tf([3.7 0],[3.7*0.1 1])

sys =

    3.7 s
-----
   0.37 s + 1

Continuous-time transfer function.

>> sysd=c2d(sys,0.1,'zoh')

sysd =

    10 z - 10
-----
           z - 0.7632

Sample time: 0.1 seconds
Discrete-time transfer function.

>>

```

Рис. 5.14 – Приклад отримання z-передатної функції з її неперервного аналогу

На рис. 5.15 наведена схема моделювання об'єкта керування.

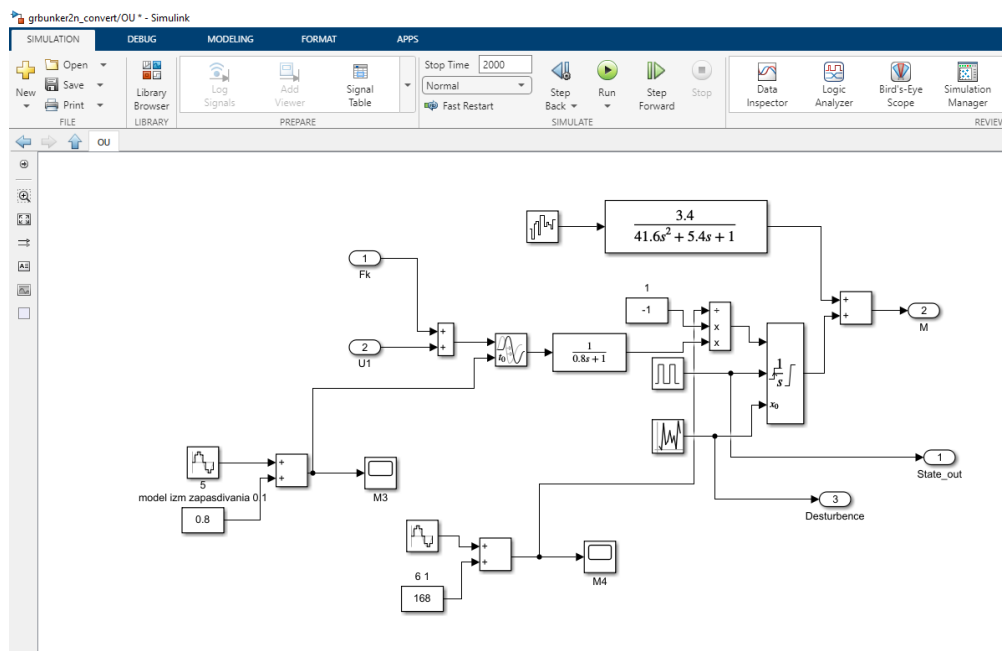


Рис. 5.15 – Схема моделювання фрагменту об'єкта керування

Результати моделювання системи керування при використанні цифрових алгоритмів які підготовлені до конвертації наведені на рис. 5.16.

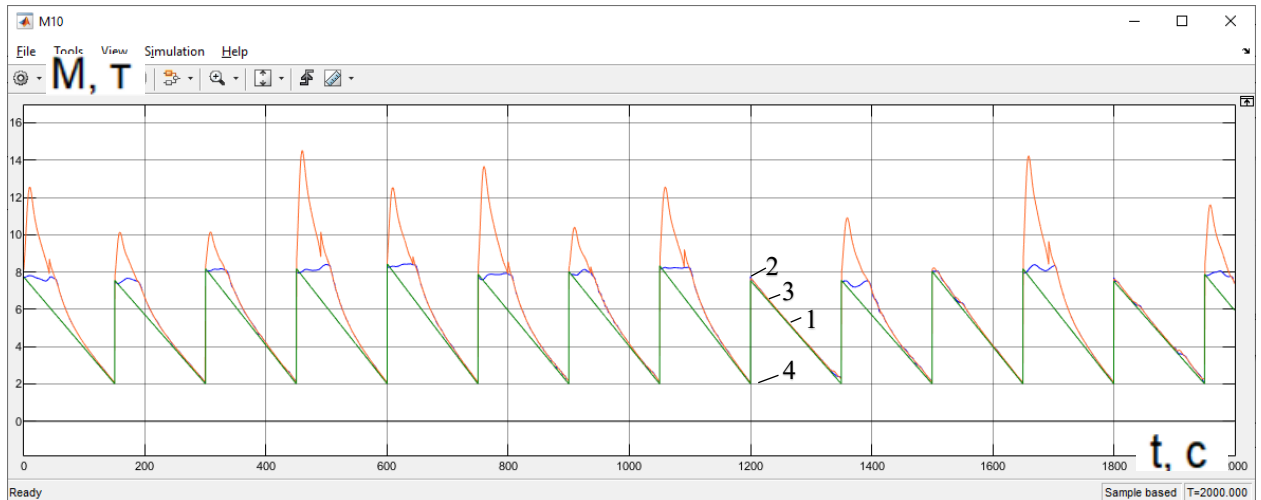


Рис. 5.16 – Результати моделювання системи гарантуючого керування за каналом регулювання маси зерна в підваговому бункері: 1 – закон зміни маси у підваговому бункері; 2 – регульована змінна (фактичне значення змінної маси); 3 – задане допустиме значення регульованої змінної (завдання яке розраховувала гарантуюча система); 4 – гранично допустиме значення регульованої змінної

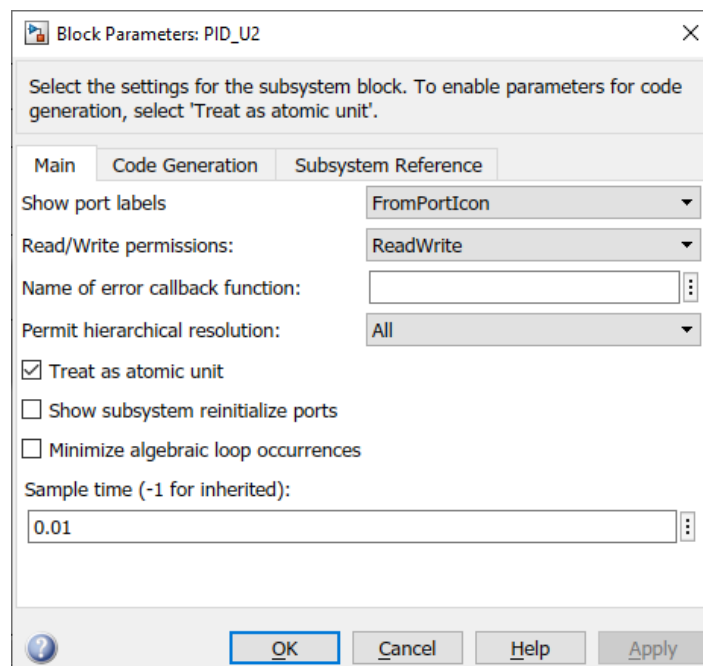


Рис. 5.17 – Вікно налаштування підсистем для їх конвертації

Для кожної підсистеми яка буде конвертуватися у мову ST середовища CodeSys v2.3 проведемо налаштування рис 5.17.

Пакет Simulink PLC Coder налаштуємо для компіляції коду для середовища CodeSys v2.3 (рис. 5.18).

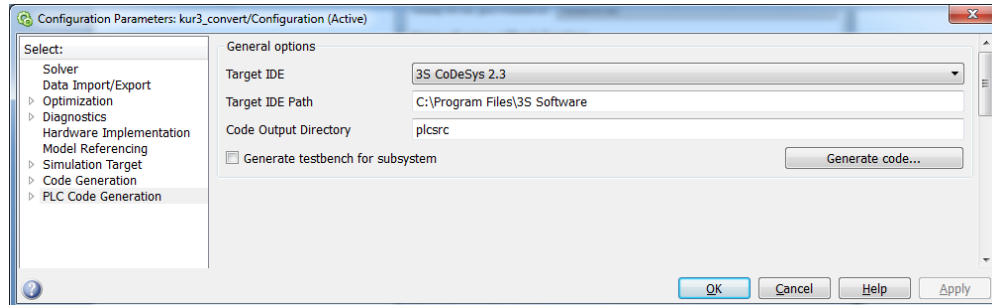


Рис. 5.18 – Вікно налаштування пакету SimulinkPLCCoder

Далі послідовно проведемо генерацію програмного коду для блоку ПД регулятора та інших блоків СГК.

На рис. 5.19 та 5.20 приведена процедура генерації коду для ПД регулятору.

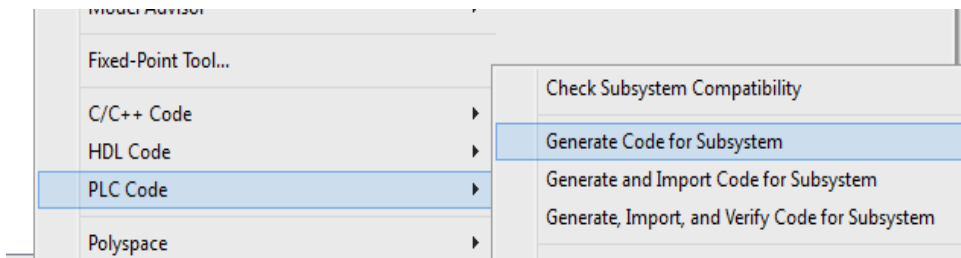


Рис 5.19. Компіляція коду

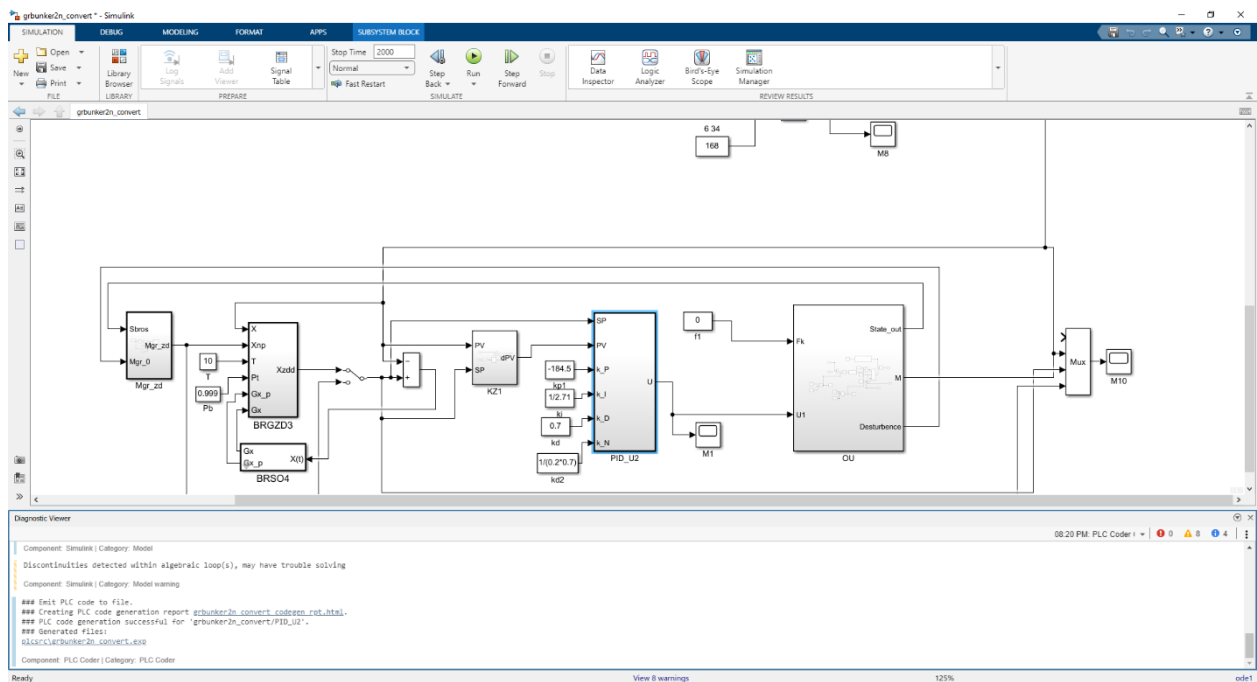


Рис. 5.20 – Результати успішної генерації коду ПІД-регулятора для середовища CodeSys v2.3

На рис. 5.21 наведено вихідний генерований код мовою ST для блоку ПІД регулятора.

```

Editor - D:\M2025_2026\plcsrc\grbunker2n_convert.exp
grbunker2n_convert.exp
9 * Model creator : user
10 * Model last modified by : user
11 * Model last modified on : Thu Nov 27 23:52:00 2025
12 * Model sample time : 0.01s
13 * Subsystem name : grbunker2n_convert/PID_U2
14 * Subsystem sample time : 0.01s
15 * Simulink PLC Coder version : 3.6 (R2022a) 13-Nov-2021
16 * ST code generated on : Sat Nov 29 20:21:00 2025
17 *
18 * Target IDE selection : 3S CoDeSys 2.3
19 * Test Bench included : No
20 *
21 *)
22 FUNCTION_BLOCK PID_U2
23 VAR_INPUT
24   ssMethodType: SINT;
25   SP: LREAL;
26   PV: LREAL;
27   k_P: LREAL;
28   k_I: LREAL;
29   k_D: LREAL;
30   k_N: LREAL;
31 END_VAR
32 VAR_OUTPUT
33   U: LREAL;
34 END_VAR
35 VAR
36   Integrator_DSTATE: LREAL;
37   Filter_DSTATE: LREAL;
38 END_VAR
39 VAR_TEMP
40   rtb_Product: LREAL;
41   rtb_Product3: LREAL;
42 END_VAR
43 CASE ssMethodType OF
44   SS_INITIALIZE:
45     (* SystemInitialize for Atomic SubSystem: '<Root>/PID_U2' *)
46     (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: '<S1>/Integrator' *)
47     Integrator_DSTATE := 0.0;
48     (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: '<S1>/Filter' *)
49     Filter_DSTATE := 0.0;
50     (* End of SystemInitialize for SubSystem: '<Root>/PID_U2' *)
51   SS_STEP:

```

Рис. 5.21 – Приклад генерованого коду ПІД – регулятора для середовища програмування CodeSys v2.3

Далі проводимо конвертування алгоритмів регулювання на основі нейронної мережі. На рис. 5.22 наведено схему моделювання САК з регулятором на основі нейронної мережі. Ця САК була розроблена у розділі 3.

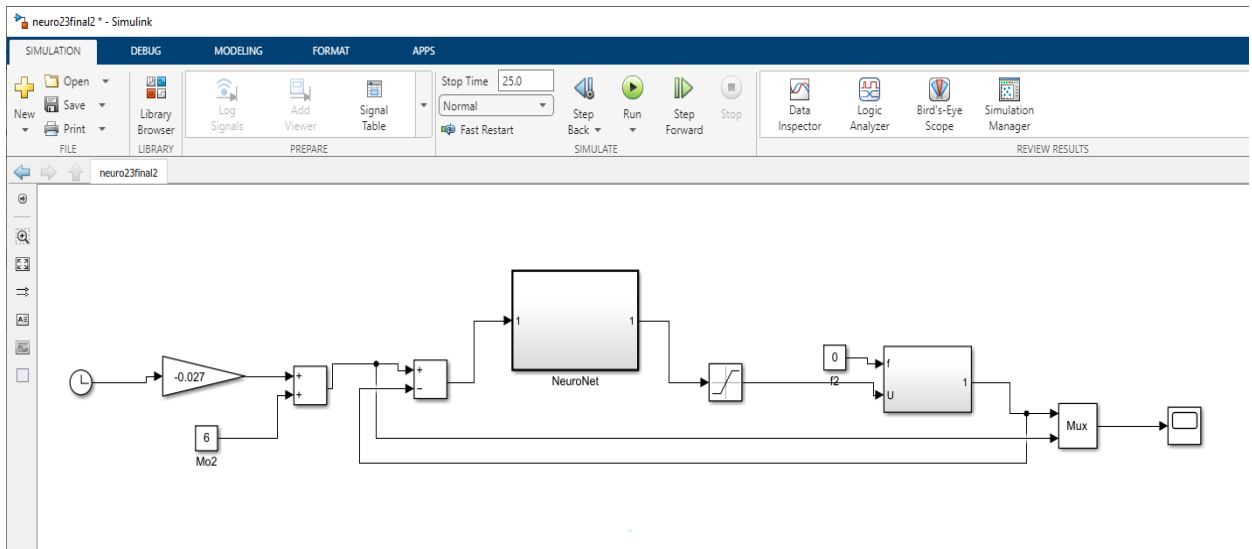


Рис. 5.22 – Схема моделювання САК процесом витоку зерна з підвагового бункера з нейрорегулятором

Схема моделювання штучної нейронної мережі блок «NeuroNet» наведена на рис. 5.23. Це є основа нейрорегулятора.

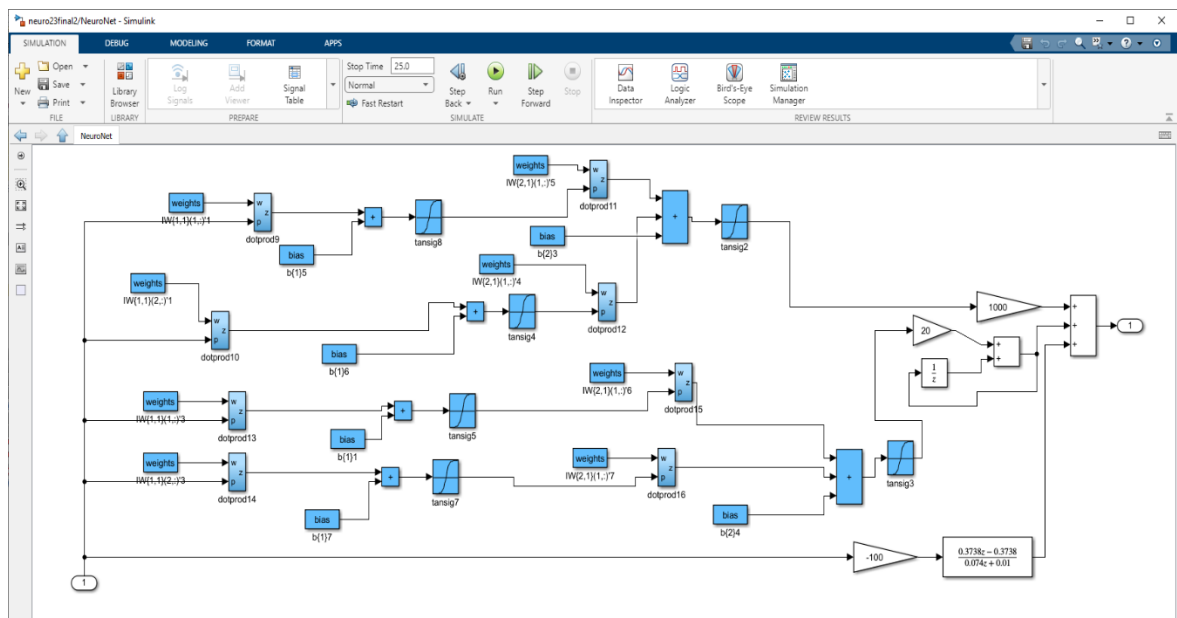


Рис. 5.23 – Схема моделювання регулятора на основі нейронної мережі

Результати моделювання системи керування процесом витоку зерна з

підвагового бункера до лінії завантаження суден при використанні штучних нейронних мереж які підготовлені до конвертації наведені на рис.5.24.

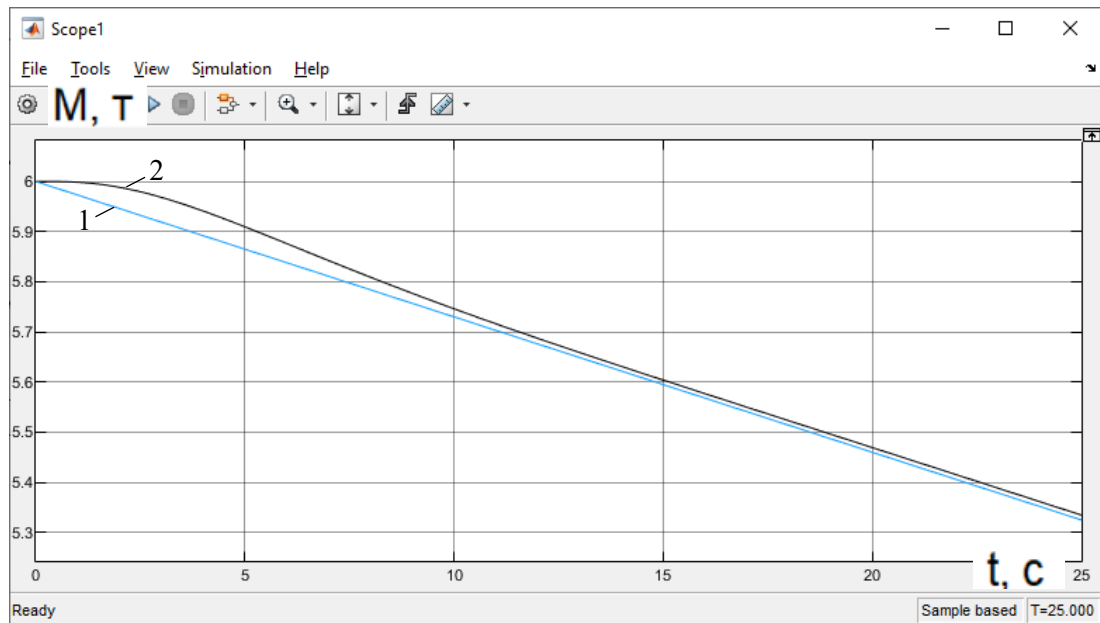


Рис. 5.24 – Динаміка зміни маси зерна в підваговому бункері: 1) Задане значення маси; 2) САК з оптимізованим регулятором, побудованим на базі ШНМ

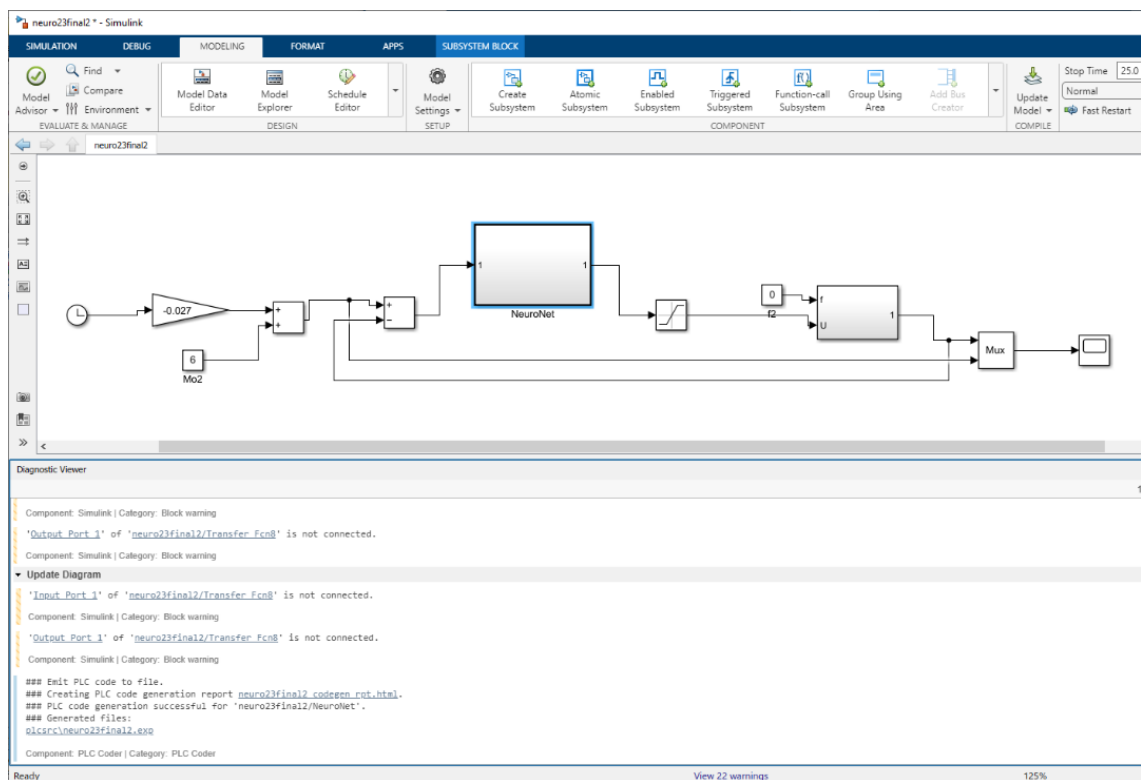
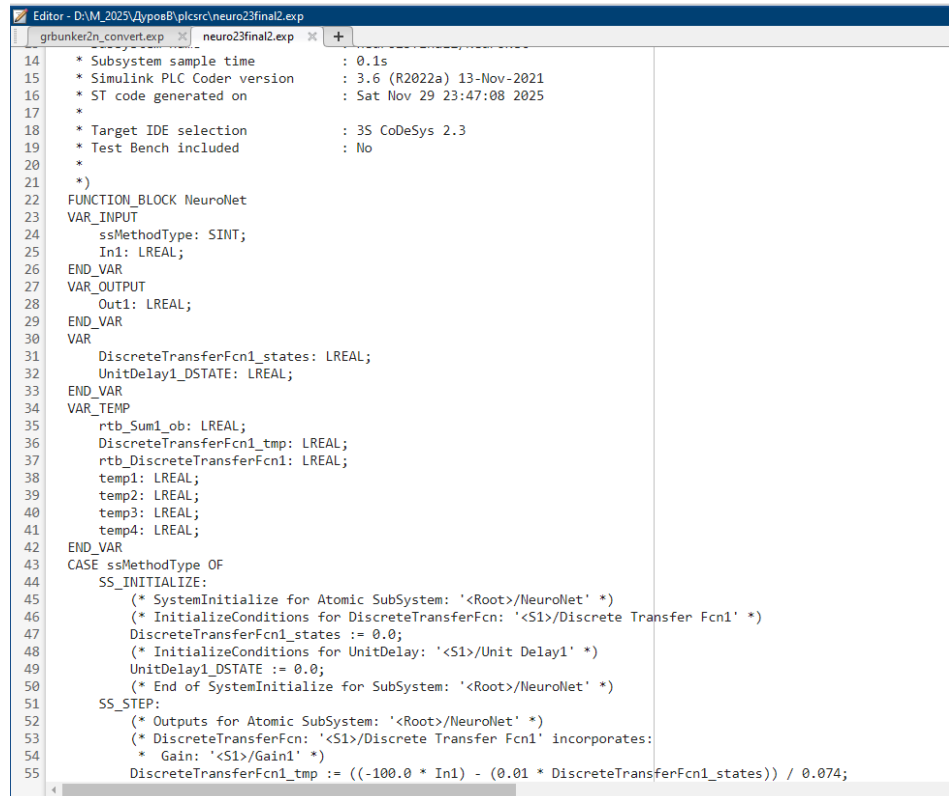


Рис. 5.25 – Результати успішної генерації коду штучної нейронної мережі («NeuroNet») для середовища CodeSys v2.3

Проведемо конвертацію моделі штучної нейронної мережі у код програми контролеру. Результати генерації коду наведено на рис. 5.25.

На рис. 5.26 наведено вихідний генерований код мовою ST для блоку «NeuroNet».



```
14 * Subsystem sample time : 0.1s
15 * Simulink PLC Coder version : 3.6 (R2022a) 13-Nov-2021
16 * ST code generated on : Sat Nov 29 23:47:08 2025
17 *
18 * Target IDE selection : 3S CoDeSys 2.3
19 * Test Bench included : No
20 *
21 *)
22 FUNCTION_BLOCK NeuroNet
23 VAR_INPUT
24     ssMethodType: SINT;
25     In1: LREAL;
26 END_VAR
27 VAR_OUTPUT
28     Out1: LREAL;
29 END_VAR
30 VAR
31     DiscreteTransferFcn1_states: LREAL;
32     UnitDelay1_DSTATE: LREAL;
33 END_VAR
34 VAR_TEMP
35     rtb_Sum1_ob: LREAL;
36     DiscreteTransferFcn1_tmp: LREAL;
37     rtb_DiscreteTransferFcn1: LREAL;
38     temp1: LREAL;
39     temp2: LREAL;
40     temp3: LREAL;
41     temp4: LREAL;
42 END_VAR
43 CASE ssMethodType OF
44     SS_INITIALIZE:
45         (* SystemInitialize for Atomic SubSystem: '<Root>/NeuroNet' *)
46         (* InitializeConditions for DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn1' *)
47         DiscreteTransferFcn1_states := 0.0;
48         (* InitializeConditions for UnitDelay: '<S1>/Unit Delay1' *)
49         UnitDelay1_DSTATE := 0.0;
50         (* End of SystemInitialize for SubSystem: '<Root>/NeuroNet' *)
51     SS_STEP:
52         (* Outputs for Atomic SubSystem: '<Root>/NeuroNet' *)
53         (* DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn1' incorporates:
54          * Gain: '<S1>/Gain1' *)
55         DiscreteTransferFcn1_tmp := ((-100.0 * In1) - (0.01 * DiscreteTransferFcn1_states)) / 0.074;
```

Рис. 5.26 – Генерований код нейронної мережі («NeuroNet»)

Після генерації коду в середовищі MATLAB додаємо створені програмні модулі до проекту який вже був створений у середовищі CodeSys v2.3.

Процес інтеграції програмних модулів у проект CodeSys v2.3 наведено на рис. 5.27, а на рис 5.28 приклад імпортованого генерованого коду для ПД регулятора.

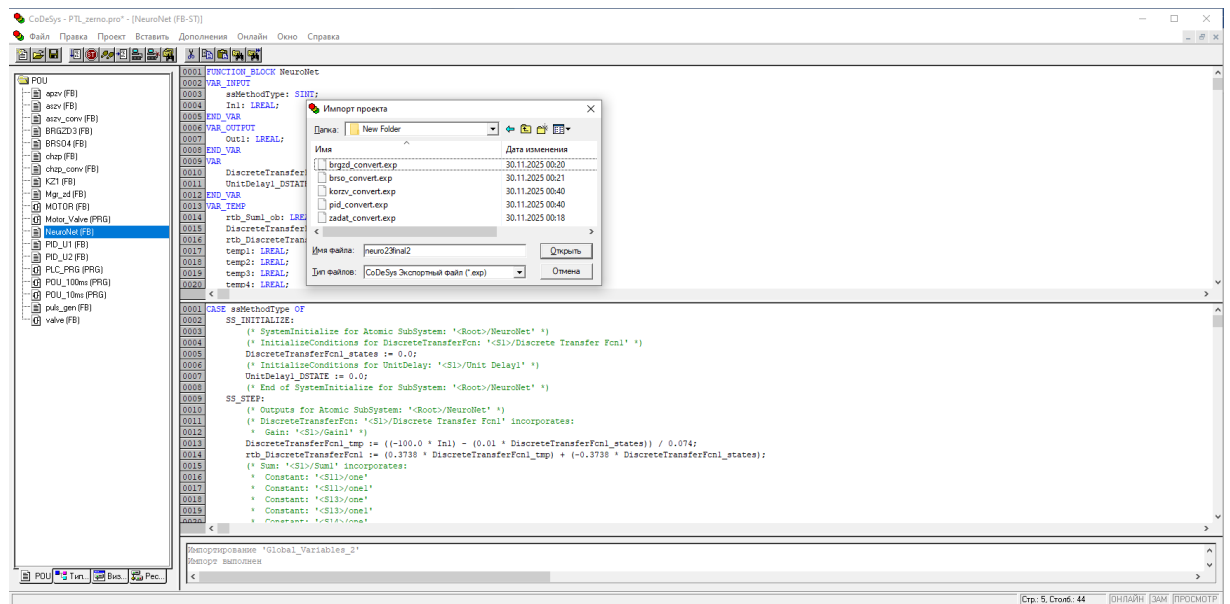


Рис. 5.27 – Процедура імпорту генерованого коду в середовище програмування CodeSys v2.3

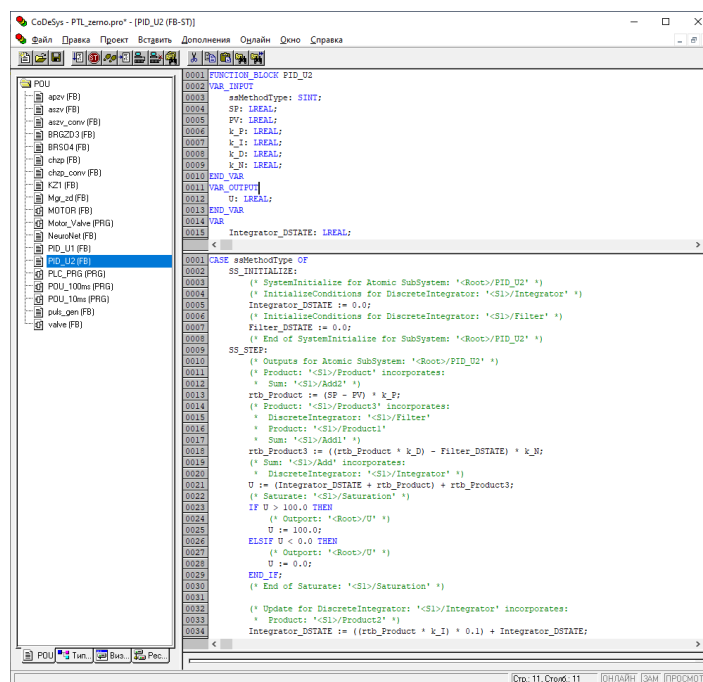


Рис. 5.28 – Приклад імпортованого коду ПІД-регулятора в середовище програмування CodeSys v2.3

Загальний вигляд розробленого проекту в середовищі CodeSys v2.3 наведено на рис. 5.29.

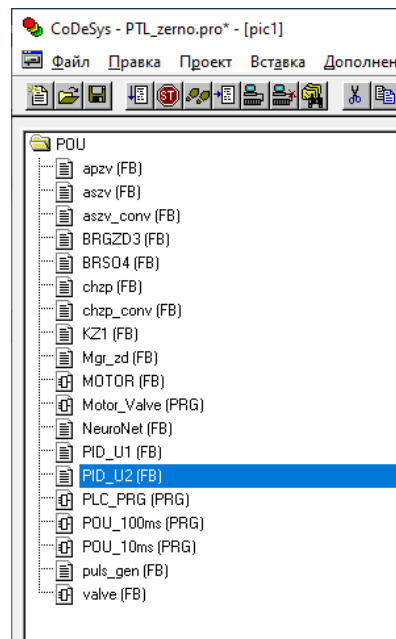


Рис. 5.29 – Загальний вид вікна проекту в середовищі CodeSys v2.3 для САК процесом витоку зерна з підвагового бункера до лінії завантаження суден

Алгоритми керування масою зерна в підваговому бункері у програмі POU_10ms. Фрагмент коду програми наведено на рис. 5.30.

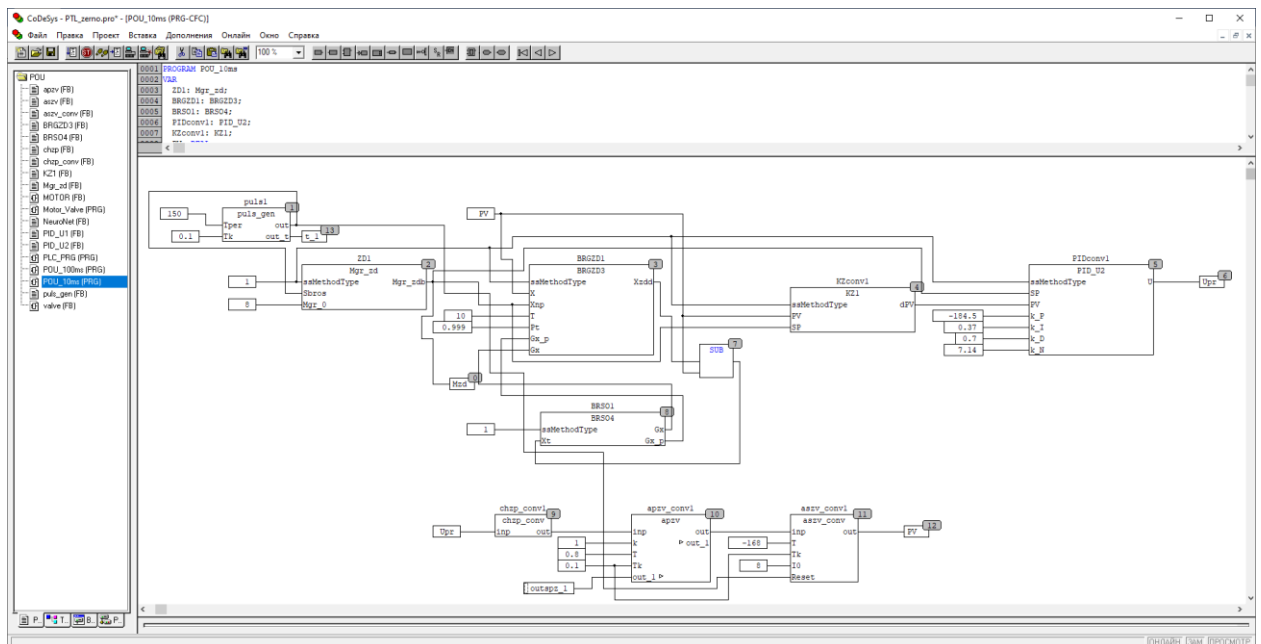


Рис. 5.30 – Фрагмент програми яка реалізує розрахунок контурів керування масою зерна в підваговому бункері

В системі керування передбачено що інтерфейс оператора процесом відвантаження зерна на судна реалізовано у SCADA системи WinCCflexible. Зв'язок контролера та РС-станції реалізовано за допомогою OPC інтерфейсу. Тому також результати тестування моделі САК процесом витоку зерна з підвагового бункера до лінії завантаження суден наведено у вікнах SCADA системи WinCCflexible на рис. 5.33-5.34.

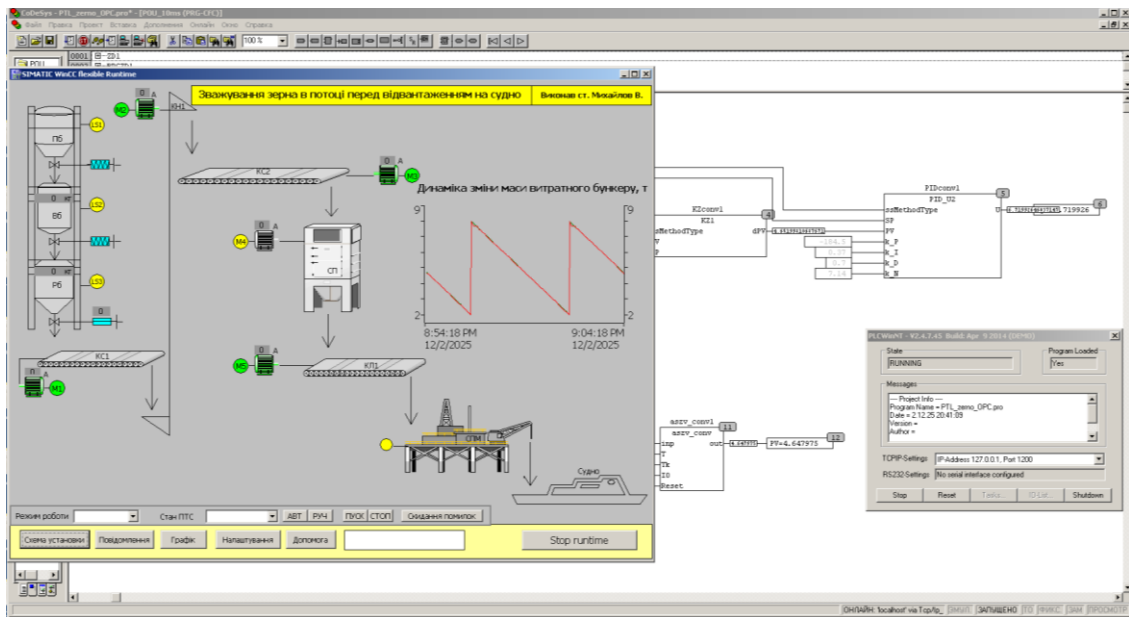


Рис. 5.33 – Результати тестування САК процесом витоку зерна з підвагового бункера до лінії завантаження суден (Вікна SCADA, проекту в CodeSys та працюючого програмного контролеру PLC WinNT)

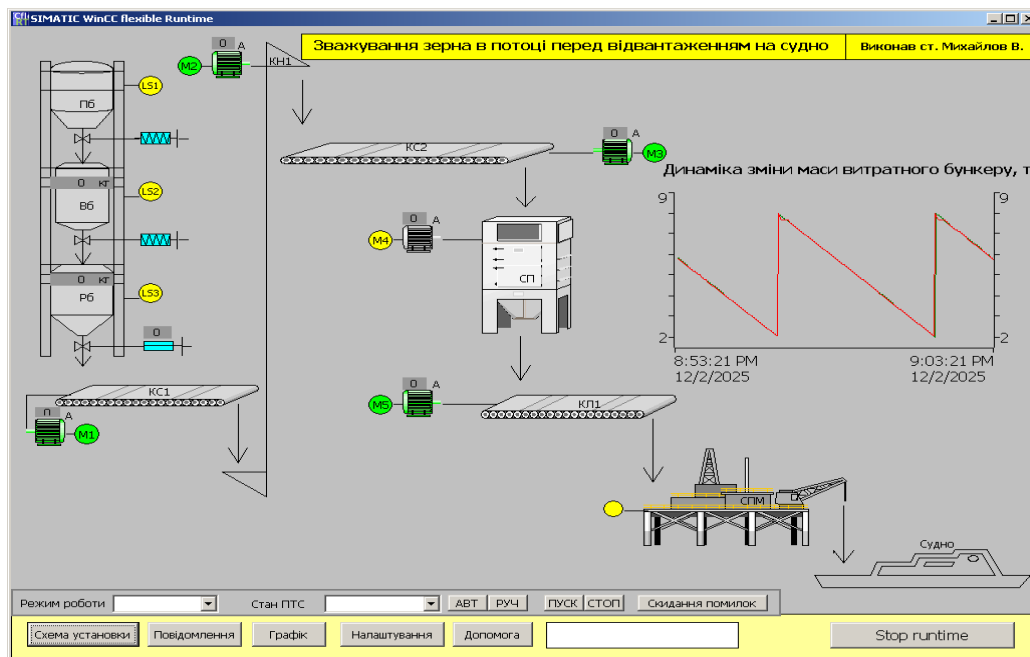


Рис. 5.34 – Результати тестування САК процесом витоку зерна з підвагового бункера до лінії завантаження суден (Вікно SCADA «Технологічна схема»)

Результати тестування підтвердили працездатність отриманих в результаті конвертації програмних модулів і ефективність застосування пакету Simulink PLC Coder.

5.3. Оцінка економічної ефективності впровадження розробок.

Розробка нової САК процесу витоку зерна з підвагового бункера до лінії завантаження суден з контуром регулювання маси зерна у підваговому бункері, а також з новою функцією гарантуючого керування цієї маси дозволило перевести процес відвантаження зерна на судна на більш ефективний режим роботи. Система забезпечує рівномірне завантаження стрічки конвеєра який подає зерно на судно-відвантажувальну машину за умовами зміни загальної продуктивності поточно-транспортної лінії відвантаження. Це дозволяє мінімізувати ймовірність переповнення зерном судно-відвантажувальної машини як при великій так і при малій продуктивності та аварійної зупинки

лінії. Крім того рівномірна подача зерна забезпечує ефективну роботу на етапах досипання зерна у трюми судна. Все перелічене в цілому дозволяє підвищити середню продуктивність завантаження судна. Функція гарантуючого керування реалізована на основі алгоритмів з динамічною зміною граничного значення маси зерна у підваговому бункері. Реалізація цієї функції забезпечує поступове спустошення підвагового бункера, без його повного спустошення до закінчення наступного циклу зважування, в умовах змінних властивостей зерна та нерівномірності його стікання. Очікуване підвищення середньої продуктивності лінії відвантаження зерна на судна складає приблизно 3 - 5%.

5.4 Висновки за розділом

1. В цьому розділі розглянута програмно-технічна структура системи керування витоку зерна з підвагового бункера до лінії завантаження суден. Обґрунтовано обрані контролер фірми WAGO, ПЗО та програмне забезпечення CodeSys v2.3 і WinCCflexible для реалізації системи.

2. Розроблені в системі Matlab моделі нових алгоритмів керування процесом витоку зерна з підвагового бункера до лінії завантаження суден (включаючи алгоритми що засновані на штучних нейронних мережах та алгоритмах гарантуючого керування) за допомогою пакету Simulink PLC Coder були конвертовані для інтеграції у середовище програмування контролерів CodeSys v2.3. Проведене тестування конвертованого програмного забезпечення підтвердило його працездатність та ефективність застосування конвертору пакета Simulink PLC Coder.

3. Розширення функцій системи керування процесом витоку зерна з підвагового бункера до лінії завантаження суден дозволяє залишити базовий контролер без змін. При цьому модернізація САК буде не великою і окупиться досить швидко.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено науково-технічну задачу, яка полягає у синтезі моделей систем керування процесом витоку зерна з підвагового бункера до лінії завантаження суден. Отримані теоретичні та науково-практичні результати в області підвищення ефективності функціонування системи керування процесом витоку зерна з підвагового бункера до лінії завантаження суден.

Основні результати і висновки магістерської роботи полягають в наступному:

1. Проведено аналіз типових систем керування процесом витоку зерна з підвагового бункера до лінії завантаження суден, обґрунтовано задачі розробки моделей більш складних та нетрадиційних систем керування зокрема на основі математичного апарату штучних нейронних мереж;
2. Синтезовані моделі систем керування підвищеної динамічної точності процесом витоку зерна з підвагового бункера до лінії завантаження суден;
3. Розроблені моделі нейромережевих систем автоматичного керування процесом витоку зерна з підвагового бункера до лінії завантаження суден;
4. Проаналізована ефективність та якість регулювання розроблених моделей систем шляхом їх імітаційного моделювання та зроблені висновки щодо принципової придатності нейромережевих алгоритмів керування та системи що реалізує функцію гарантуючого керування процесом витоку зерна з підвагового бункера;
5. Розглянуті основні рішення до впровадження на підприємстві розроблених моделей систем автоматичного керування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Конспект лекцій "Ідентифікація та моделювання об'єктів автоматизації" для студентів спеціальності 151 / Укладач В.А. Хобін. – Одеса: ОНАХТ, 2019. – 97 с.
2. Хобін В.А. Конспект курсу лекцій з дисципліни «Теорія автоматичного керування» частина 1, для студентів спеціальності 151 денної та заочної форм навчання. – Одеса: ОНАХТ, 2019. – 112 с.
3. Хобін В.А. Конспект курсу лекцій з дисципліни «Теорія автоматичного керування» частина 2, для студентів спеціальності 151 денної та заочної форм навчання. - Одеса: ОНАХТ, 2019. - 87 с.
4. Хобін В.А., Світий І.М. Теорія автоматичного керування: Посібник до виконання комплексної курсової роботи. Одеська національна академія харчових технологій, 2020. – 277 с.
5. Михайлов В.О. Автоматизація процесу керування витоком зерна з підвісового бункера до лінії завантаження суден (рукопис) / Випускна робота бакалавра. - Одеса: ОНТУ, 2023. - 169с.
6. Нікольський Ю.В., Пасічник В.В., Щербина Ю.М. Системи штучного інтелекту [Текст] / Нікольський Ю.В., Пасічник В.В., Щербина Ю.М. – Львів: «Магнолія» – 2010. – 279с.
7. Литвин В.В. Інтелектуальні системи [Текст] / Литвин В.В., Пасічник В.В, Яцишин Ю.В. – Львів: «Новий Світ» - 2008. - 406с.
8. Руденко О.Г. Штучні нейронні мережі [Текст] / Руденко О.Г., Бодянський Є.В. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 404с.
9. Василець Т. Ю. и др. Синтез нейромережевого регулятора для електромеханічної системи з пружними зв'язками в кінематичних передачах //Системи обробки інформації. – 2018. – №. 2. – С. 7-17.



(11) 159885

(19) UA

(51) МПК (2025.01)
G01G 13/00

(21) Номер заявки: u 2024 05483

(22) Дата подання заявки: 20.11.2024

(24) Дата, з якої є чинними
права інтелектуальної
власності: 17.07.2025

(46) Дата публікації відомостей
про державну реєстрацію
та номер Бюлетеня: 16.07.2025,
Бюл. № 29

(72) Винахідники:

Михайлов Володимир
Олегович, UA,
Світій Іван Миколайович,
UA,
Воїнова Світлана
Олександрівна, UA

(73) Володілець:

Михайлов Володимир
Олегович,
вул. Паустовського, 25, кв. 73,
м. Одеса, 65111, UA,
Світій Іван Миколайович,
вул. Центральний аеропорт,
15, кв. 88, м. Одеса, 65036, UA,
Воїнова Світлана
Олександрівна,
вул. Транспортна, 8, кв. 17, м.
Одеса, 65039, UA

(54) Назва корисної моделі:

СПОСІБ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЗВАЖУВАННЯМ ЗЕРНА ПРИ ЙОГО ВИПУСКУ З
ПІДВАГОВОГО БУНКЕРА

(57) Формула корисної моделі:

Спосіб автоматичного керування зважуванням зерна при його випуску з підвагового бункера, що включає регулювання маси зерна у підваговому бункері шляхом зміни положення його засувки, який відрізняється тим, що додатково сигнал заданого значення маси зерна у підваговому бункері перетворюють у коригуючий ланці та подають на вхід регулятора маси зерна, причому перетворення здійснюють з можливістю забезпечення інваріантності до передісторії заданого значення.

(11) 159885

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ Державна організація «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій» (УКРНОІВІ)
Цей паперовий документ ідентичний за документарною інформацією та реквізитами електронному документу з електронним підписом уповноваженої особи Державної організації «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій». Паперовий документ містить 2 арк., які пронумеровані та прошиті металевими люверсами. Для доступу до електронного примірника цього документа з ідентифікатором 2007160725 необхідно: 1. Перейти за посиланням https://sis.nipo.gov.ua. 2. Обрати пункт меню Сервіси – Отримати оригінал документу. 3. Вказати ідентифікатор електронного примірника цього документу та натиснути «Завантажити».
Уповноважена особа УКРНОІВІ 16.07.2025   І.Є. Матусевич

АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИТОКУ ЗЕРНА З ПІДВАГОВОГО БУНКЕРУ AUTOMATION OF GRAIN LEAKAGE FROM THE UNDER-WEIGHING HOPPER

Михайлов В. О.

Mykhailov V. O.

Одеський національний технологічний університет, Одеса, Україна

ORCID 0009-0007-0709-8169

E-mail rollzed27@gmail.com

Анотація. Найважливішу роль у вирішенні державних завдань із забезпечення економічної та соціальної безпеки відіграє зернопереробний комплекс. Оскільки зерно також є стратегічним продуктом і експортується за кордон, дуже важливим є забезпечення умов його транспортування, в основному водним транспортом і збереження його споживчих властивостей. Технологічний процес завантаження суден зерном вимагає якомога більшої стабільності за умови заданої продуктивності поточно-транспортної системи. Для забезпечення високої ефективності цього процесу ним треба керувати з використанням сучасних засобів автоматизації. Тому автоматизація процесу завантаження суден зерном є актуальним завданням. Розглянуто технологічний процес витоку зерна з підвагового бункера. Розроблено параметризовану, параметричну та координатну схему підвагового бункера як об'єкта керування. Конкретизовано основні регламенти. Проведено структурну і параметричну ідентифікацію моделі каналу перетворення дій об'єкта регулювання. Розроблено і параметрично оптимізовано алгоритми регулювання. Вибрано технічні засоби, за рахунок яких можна провести модернізацію обладнання. Розроблено технічну структуру мікропроцесорного ядра системи керування, здійснений вибір промислового контролера та його блоків вводу/виводу. В середовищі CoDeSys розроблені програми, які реалізують алгоритми логічного керування та регулювання. При виконанні роботи в середовищі SCADA-системи WinCCFlexible розроблено програмне забезпечення АРМ оператора і налагодчика САК процесом витоку зерна з підвагового бункера. Розроблено варіант комплексу технічної документації САК. Розглянуто питання техніки безпеки при монтажі, налагодженні та експлуатації розробленої системи.

Abstract. The grain processing complex plays the most important role in solving state tasks to ensure economic and social security. Since grain is also a strategic product and is exported abroad, it is very important to ensure the conditions for its transportation, mainly by water transport, and to preserve its consumer properties. The technological process of loading ships with grain requires the greatest possible stability given the set productivity of the flow-transport system. To ensure high efficiency of this process, it must be managed using modern automation tools. Therefore, automation of the process of loading ships with grain is an urgent task. The technological process of grain leakage from the under-weighing hopper is considered. A parameterized, parametric and coordinate scheme of the under-weighing hopper as a control object is developed. The main regulations are specified. A structural and parametric identification of the model of the channel for transforming the actions of the regulated object is carried out. Regulation algorithms are developed and parametrically optimized. Technical means are selected, due to which equipment can be modernized. The technical structure of the microprocessor core of the control system has been developed, the industrial controller and its input/output blocks have been selected. Programs that implement logical control and regulation algorithms have been developed in the CoDeSys environment. When performing work in the WinCCFlexible SCADA system environment, the software for the workstation of the operator and adjuster of the automatic control system for the process of grain leakage from the under-weighing hopper has been developed. A version of the set of technical documentation for the automatic control system has been developed. Safety issues during installation, adjustment and operation of the developed system have been considered.

Ключові слова: автоматизація, автоматичне керування, виток зерна, підваговий бункер, інваріантність до передісторії заданого значення.

Key words: automation, automatic control, grain leakage, under-weighing hopper, invariance to the prehistory of a set value.

Вступ. Найважливішу роль у вирішенні завдань із забезпечення економічної та соціальної безпеки будь-якої країни відіграє зернопереробний комплекс, що включає виробництво зернових культур та їх подальшу

переробку. Зернопереробка має не тільки важливе соціально-економічне значення, а й політичне для розвитку національної економіки та забезпечення продовольчої безпеки держави. Зерно завжди належало до конкурентоспроможних продуктів на світовому ринку. Однією з характерних особливостей зернопереробки є те, що один і той же продукт може використовуватись за різним призначенням.

Зернопереробний комплекс, будучи відкритою системою, взаємодіє з іншими сферами промисловості, споживаючи продукцію сполучених галузей (машинобудування, хімічна промисловість тощо), залучаючи ресурси фінансової системи та забезпечуючи цим задоволення потреб у продуктах харчування. Тобто, забезпечення ефективного розвитку цього сегмента дозволить найбільш повно задовольняти найперші потреби населення та стимулювати розвиток інших соціально-економічних систем.

Оскільки зерно не тільки фігурує в рамках внутрішнього споживання, але й експортується за кордон, дуже важливим є забезпечення умов його транспортування і збереження його споживних властивостей. В основному транспортування продукту забезпечується водним транспортом. Технологічний процес завантаження суден зерном вимагає якомога більшої стабільності за умови заданої продуктивності поточно-транспортної системи (ПТС). На практиці цей процес здійснюється вручну, - продуктивність конвеєрів, ступінь відкриття засувки тощо виставляються, керуючись досвідом оператора. Процес часто супроводжується нештатними зупинками ПТС з причини перевантаження лінії, просипання зерна тощо, тобто має низьку ефективність. Для підвищення ефективності процесу, зниження витрат через нештатні простоювання лінії, втрати зерна при транспортуванні тощо процесом завантаження суден зерном треба керувати з використанням сучасних засобів автоматизації. Тому, автоматизація процесу завантаження суден зерном є актуальним завданням.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Оскільки розглянуте питання є актуальним, багато дослідників займалися його вивченням. Так, А. Є. Єруланова та Г. К. Шадрин запропонували спосіб безперервного дозування сипких матеріалів шляхом порівняння сигналу ваговимірювача з сигналом задатчика продуктивності та наступним керуючим впливом на живильник, у якому вимірюють погонне навантаження сипкого матеріалу, порівнюють його із заданим, після чого подають керуючий сигнал на виконавчий механізм [1]. Компанія «Сімо» розробила систему обліку сипких матеріалів у потоці, яка містить можливість завдання кількості матеріалу, що відвантажується, індикацію ваги порції, автоматичне керування процесом дозування, підтримання продуктивності ваг, тензодатчики, ваговий процесор для вимірювання та індикації поточної продуктивності ваг і значення маси матеріалів, що зважуються [2]. Компанія «Інновінпром» винайшла можливість відвантаження заданої маси продукту встановленими дозами в автоматичному і напівавтоматичному режимах, видачі інформації про поточну та сумарну вагу продукту, що пройшов через ваги і кількість відвантажених доз на дисплей вагового термінала та локальну мережу, можливість оперативного регулювання продуктивності ваг і зміни завдання ваги доз, включення ваг у систему кількісного та якісного обліку зернопродуктів на підприємстві [3]. Компанія «Grain capital» створила систему автоматичного керування зважуванням зерна, яка містить автоматичний облік зважуваної дози зерна за допомогою мікроконтролера, на який надходить інформація від тензодатчиків, забезпечуючи контроль стану ваг та дозволяючи проводити дозування і тарування [4]. Компанія «Ваговимірювальні системи» розробила спосіб автоматичного керування зважуванням зерна при його випуску з підвагового бункера, який містить регулювання маси зерна у підваговому бункері шляхом зміни положення його засувки [5]. Підприємство LLC "Hyperpress Technologies" виготовляє бункерні дозатори автоматичні АДМ-500/2 для дозування сипкого матеріалу на бетонних заводах, лініях для пресування цегли, лініях для вібропресування, лініях сортування, та як окрема одиниця для дозування інертних матеріалів. Дозатори можуть дозувати одночасно два інертних наповнювача на базі контролера з високою точністю. Транспортер встановлений на чотирьох тензодатчиках, що дозволяє точно вимірювати кількість матеріалу, містить автоматичну систему керування пневмоциліндрів [6]. НВП «Механотрон» запропонувало ваги бункерні «Норма-ТН1» для зважування сипких продуктів в потоці при неперервному русі продукту з транспортера або під час відбору з накопичувального бункера, які містять регулювання подачі, відбір заданої кількості продукту, облік кількості доз [7]. Американська компанія «COMPUWEIGH» запропонувала бункерні ваги з автоматичним пробовідбірником, який проводить перехресний відбір проб зерна без необхідності зупинки потоку [8]. В основу дії ваг, розроблених компанією Danvaegt, покладено автоматичне переривчасте зважування. Подача продукту та розвантаження бункерів починається та припиняється автоматично під час зважування, контролюється за допомогою сигналів від тензодатчиків з індикацією роботи датчиків «порожній» і «повний» у бункерах. Система зважування забезпечує максимальну точність і швидкість зважування з урахуванням об'єму вагового бункера, швидкості вивантаження, кількості і виду матеріалу, а також вмісту вологи в ньому [9]. Недоліком розглянутих систем є низька точність дозування в результаті нестабільності подачі сипкого матеріалу в підваговий бункер.

В Одеському національному технологічному університеті, на кафедрі автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем запропоновано ефективну систему автоматичного керування процесом витоку зерна з підвагового бункера [10].

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності процесу витоку зерна з підвагового бункера шляхом компенсації нестабільності продуктивності поточно-транспортної системи.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання:

– аналіз процесу витоку зерна з підвагового бункера як об'єкту керування;

- розробка комплексу моделей процесу витоку зерна як об'єкту регулювання і проведення моделювання для підтвердження відповідності отриманих моделей експериментальним даним;
- розробка варіантів алгоритмів регулювання, проведення їх параметричної оптимізації, порівняльного аналізу САР, синтезу та аналізу САР підвищеної динамічної точності;
- складання регламенту функціонування та алгоритмів пуску-зупинки процесу;
- проведення вибору технічних засобів, які забезпечують належне керування процесом;
- розробка технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування процесом витоку зерна з підвагового бункера;
- вибір промислового контролеру та його блоків вводу/виводу;
- розробка програм, які реалізують алгоритми логічного керування та регулювання в середовищі CoDeSys;
- створення системи за допомогою середовища WinCCFlexible, розробка програмного забезпечення APM оператора і налагоджувача САК процесом витоку зерна з підвагового бункера;
- розробка комплекта технічної документації САК;
- розгляд питання безпечної експлуатації системи.

Методи і матеріали досліджень. Основним використаним методом дослідження є метод системного аналізу. Для ідентифікації моделей використано методи активного та пасивного експерименту, метод типової статистичної ідентифікації та інженерні методи ідентифікації моделі об'єкта керування (ОК). При синтезі САР було використано методи теорії автоматичного керування, а саме інженерні методи параметричного синтезу САР, оптимального параметричного синтезу, принцип інваріантності до передісторії заданого значення. Основним експериментальним методом обрано імітаційне моделювання.

Результати досліджень. На початку дослідження було проаналізовано технологічний процес витоку зерна з підвагового бункера. З ліній прийому зерна з залізничного транспорту продукт потрапляє в бункерні ваги ВБ 2 для зважування, з яких зерно (пшениця, ячмінь, ріпак, горох тощо) переміщується конвеєром КС5, після чого воно норією КН4 піднімається до конвеєра КС4 і транспортується в сепаратор СП для обробки зернових культур, потім потрапляє на конвеєр КЛ1 і з нього - в спеціальну судновантажну машину СПМ, через яку продукт надходить у трюми вантажного корабля.

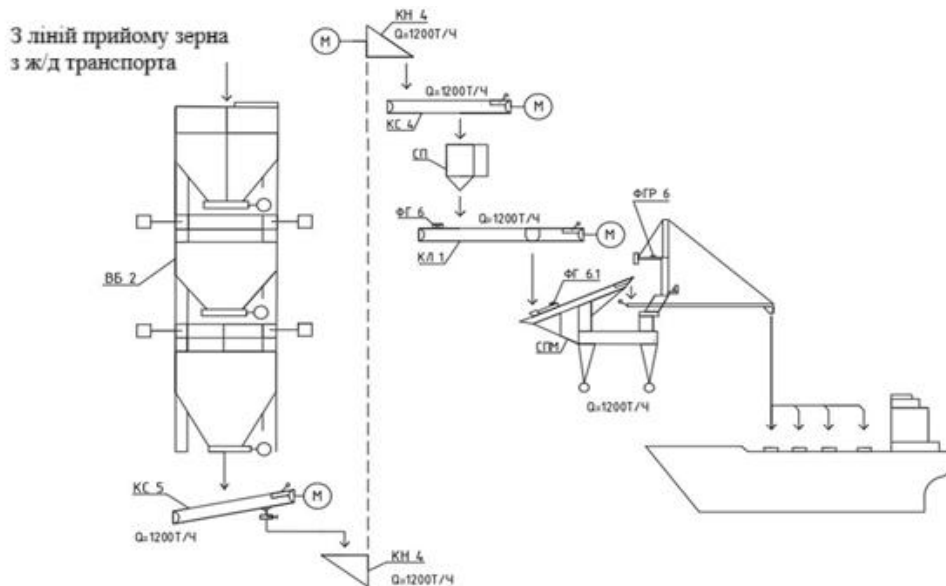


Рисунок 1 – Технологічна схема процесу керування витоком зерна з підвагового бункера до лінії завантаження суден

Далі було проведено параметризацію технологічної схеми (рис. 2), побудовано параметричну схему (рис. 3) та структурну схему об'єкта регулювання (ОР) (рис. 4).

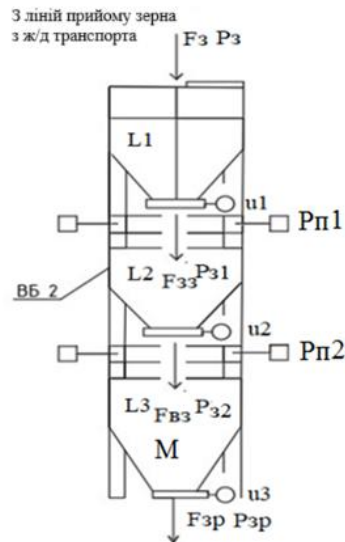


Рисунок 2 – Параметризована технологічна схема бункерних ваг

На рис.2 наведено такі позначення:

F_z – витрата зерна, кг/с;

P_z – тиск зерна після конвеєра, МПа;

L_1 – рівень у бункері 1, м;

$P_{п1}$ – тиск пневмомережі 1, МПа;

U_1 – керуюча дія пневмозасувки бункера 1, % х.р.о;

$P_{зз}$ – тиск зерна після бункера 1, МПа;

L_2 – рівень у бункері 2, м;

$F_{зз}$ – витрата засипного зерна у бункері 2, кг/с;

M – маса бункера, т;

$P_{з1}$ – тиск зерна після бункера 1, МПа;

$P_{п2}$ – тиск пневмомережі 2, МПа;

U_2 – керуюча дія пневмозасувки бункера 2, % х.р.о;

L_3 – рівень у бункері 3, м;

$F_{вз}$ – витрата зваженого зерна в бункері 3, кг/с;

$P_{з2}$ – тиск зерна після бункера 2, МПа;

P_r – тиск гідромережі, МПа;

U_3 – керуюча дія пневмозасувки бункера 3, % х.р.о

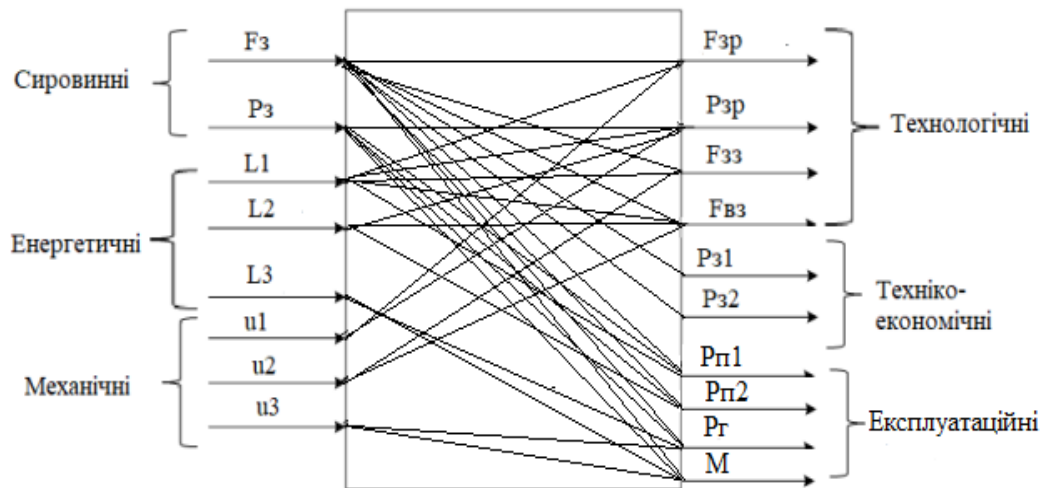


Рисунок 3 – Параметрична схема технологічного процесу витоку зерна з підвагового бункера

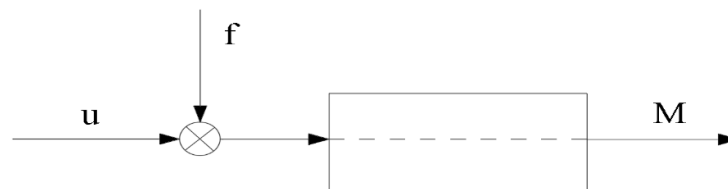


Рисунок 4 – Структурна схема процесу витоку зерна з підвагового бункера як об'єкту регулювання

u – положення регулюючого органу, %х.р.о.;

M – маса зерна в підваговому бункері, т;

f – вектор неконтрольованих збурень.

Провели ідентифікацію моделі каналу « u - M » перетворення об'єкта регулювання. За результатами активного експерименту об'єкт визначено як астатичний. Було побудовано схему моделі неконтрольованих збурень. Генерацію результатів пасивного експерименту забезпечено програмою *rpen* у середовищі *Mathlab*. Для ідентифікації моделей неконтрольованих координатних збурень використали програму *IdSoft* середовища *Mathlab*.

Провели реалізація моделей у середовищі *Mathlab* і підтвердження їх відповідності експериментальним даним.

В пакеті *Simulink* середовища *Mathlab* для каналу ОК розроблено схему моделювання для моделі 1-го і 2-го порядку. Для реалізації повної моделі ОК об'єднано моделі динаміки каналів ОК.

Модель ОК достатньо точно відображає експериментальні дані, що означає адекватність моделі ОК.

Для відтворення моделі збурень як стохастичних процесів (СП) із заданими властивостями використано метод формуючого фільтру. Похибка відтворення σ_f менша 5%, а значить точність моделі неконтрольованих збурювань є достатньою.

Повна модель ОК містить у собі повну модель каналів і модель входних дій. Проведено експерименти з повною моделлю ОК. Як показують їх результати, модель ОК в достатній мірі відтворює результати експериментальних досліджень.

Здійснено конкретизацію задач регулювання технологічним агрегатом та автоматизовано кожне із завдань керування.

Процес керування витоком зерна з підвагового бункера є об'єктом неперервної дії. Для нього є характерним тривалий робочий режим, на який об'єкт виводять дистанційно. Режими пуску і зупинки є неекономічними режимами роботи установки. Підвищення економічної ефективності роботи цього процесу в режимах пуску і зупинки можна досягти, автоматизувавши ці завдання. Тому для даного технологічного процесу актуальна автоматизація задачі логічного керування.

Відповідно до нормативів ведення технологічних процесів маса M має підтримуватися на рівні 5т з точністю $\pm 0,1$ т. За цим параметром припустимі короточасні відхилення до $\pm 0,5$ т протягом часу не більше 8 с.

Регламентом на функціонування САР витоком зерна з підвагового бункера висуваються жорсткі вимоги до тривалих відхилень, тому в якості критерію оптимальності обрано інтегральний модульний критерій, що істотно штрафує незначні відхилення і мало штрафує короточасні відхилення:

$$J = \int_0^{t_M} [|\Delta M(t)|] dt$$

Основу керування становить інформація про мету керування або про бажаний стан ОК $\bar{y}^*$, про поточний стан ОК $\bar{y}$ та про збурення $\bar{f}$. Для системи керування процесом витоку зерна з підвагового бункера доступною, крім інформації про бажаний стан ОК, є інформація про поточний стан ОК. Такий обсяг інформації для формування керуючого впливу (u) достатній для реалізації замкненого принципу керування. Тому саме цей принцип і покладено в основу розробленої САР.

Проведено параметричний синтез і аналіз САР базової структури.

Процес за каналом « u - M » має астатичні властивості, тому в якості альтернативних варіантів алгоритмів регулювання обрано пропорційно-інтегральний (ПІ) і пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) алгоритми регулювання.

Порівняли перехідні процеси в САР з ПІД-регулятором до і після оптимізації за інтегральним і прямими показниками якості (табл. 1).

Таблиця 1 – Результати порівняння варіантів САР

Алгоритм регулювання	Прямі показники якості		Критерій
	$\Delta M^{\text{МАКС}}$	$T_{\text{пп}}, \text{с}$	
ПІ	0,0675	7,28	0,349
ПІД	0,0392	3,28	0,1455

Як видно з результатів порівняння перехідних процесів, САР з ПД-регулятором є кращою за усіма показниками. Тому далі використано ПД-закон регулювання.

САР і з ПІ-регулятором і з ПД-регулятором є грубою.

Результати оцінки САР на грубість показують, що "найсприятливішим" для керування сполученням параметрів ОК є більший на 20% час запізнення ОК, а "найнесприятливішим" для керування сполученням - на 20% менший час запізнення.

Проведено структурний і параметричний синтез САР підвищеної динамічної точності і її аналіз.

Виявлено, що основною причиною недостатньої динамічної точності САР є зміна передісторії заданого значення. Основним шляхом підвищення динамічної точності розглянутої САР є побудова САР, інваріантної до передісторії заданого значення (рис. 5).

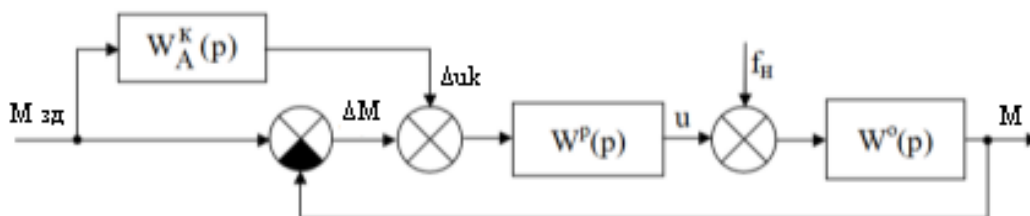


Рисунок 5 – Структурна схема САР підвищеної динамічної точності

Було конкретизовано задачу і розроблено алгоритм логічного керування пуском ділянки ПТЛ завантаження суден.

Здійснено вибір технічних засобів отримання інформації про змінні процесу та реалізацію керуючих впливів, які забезпечують належне та якісне керування процесом витоку зерна з підвагового бункера. Класи точності, ступінь захисту та ступінь вибухозахисту пристроїв відповідають виробничим умовам технологічного процесу.

Програмна реалізація алгоритмів логічного керування виконана в програмному модулі PLC_PRG. Графічний інтерфейс при тестуванні алгоритму пуску наведено на рис. 6. Розроблена технічна структура мікропроцесорного ядра системи процесу керування витоком зерна з підвагового бункера до лінії завантаження суден, здійснений вибір промислового контролера та його блоків вводу/виводу, в середовищі CoDeSys, розроблені програми, які реалізують алгоритми логічного керування та регулювання, проведена їх перевірка, яка засвідчила роботоспроможність програм та їх відповідність алгоритмам керування.

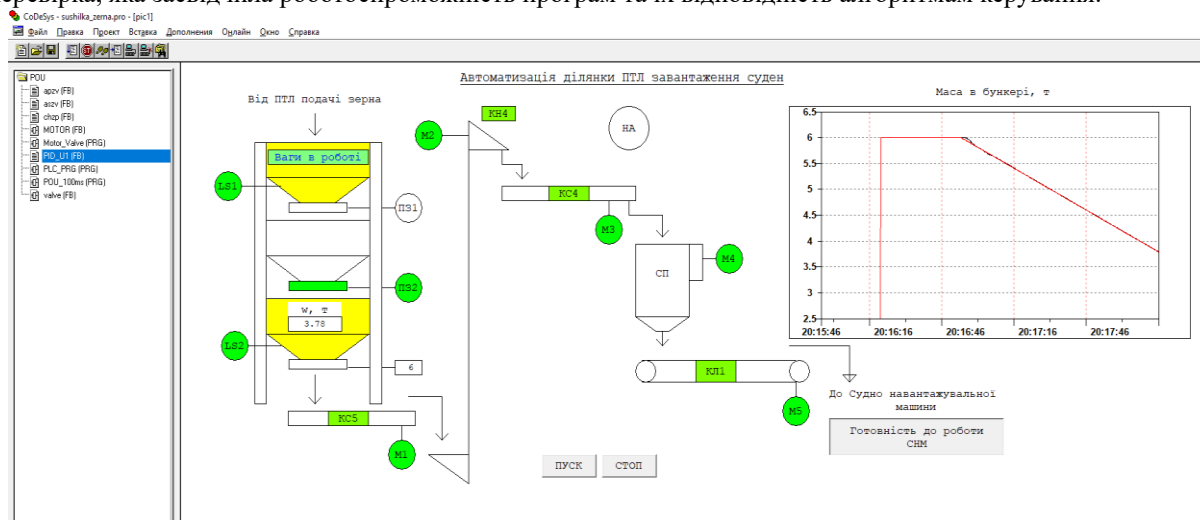


Рисунок 6 – Фрагмент графічного інтерфейсу оператора

Результати тестування програми у режимі емуляції контролеру, що реалізує керування пуском та останком процесу, підтверджують коректність реалізації програми моделі САР та програми логічного керування.

Розроблена SCADA-система для автоматизованого робочого місця технолога і наладчика САК. Конкретизовано функції і структури екранів АРМ оператора-технолога. На рис. 7 представлений екран «Схема установки» при працюючому в автоматичному режимі процесі, без порушень режиму роботи і справному обладнанні з відкритими екранними формами керування засувками і двигунами.

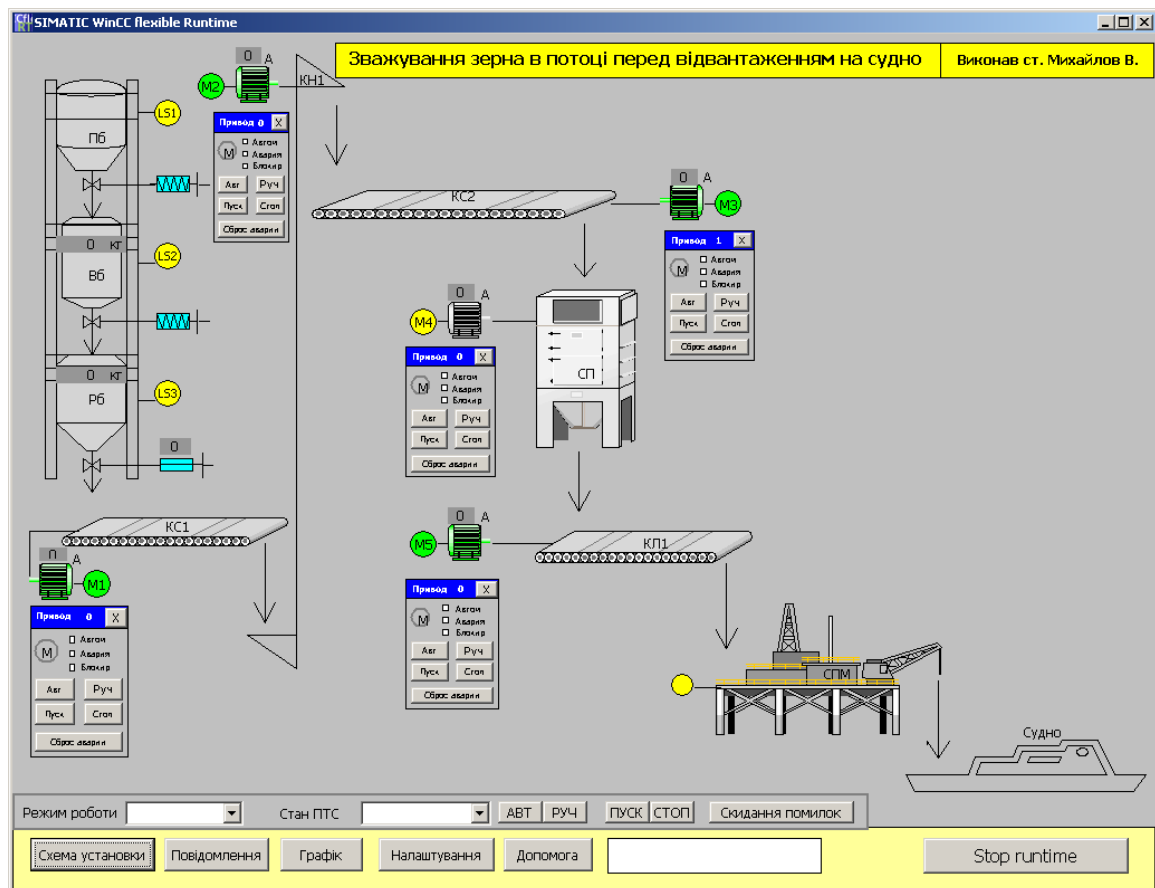


Рисунок 7 – Загальний вигляд екрану «Схема установки» при нормальній роботі

АРМ дозволяє контролювати хід технологічного процесу, задавати режими роботи, здійснювати перемикання режимів керування обладнанням поточно-транспортної лінії (АВТ / РУЧ) і керувати в ручному режимі окремих обладнання, проводити налаштування і налагодження САК, відображати динаміку зміни технологічних параметрів, вести журнали подій, проводити адміністрування користувачів програми.

Розроблено фрагменти документації технічного забезпечення САК та заходів з охорони безпеки. Виконаний опис функціональної схеми автоматизації, опис принципової електричної схеми електроприводу та опис принципової електричної схеми живлення.

Обговорення результатів. САР з ПІД-регулятором в перехідних режимах задовольняє гранично припустимим вимогам, а САР з ПІ-регулятором не задовольняє цим вимогам за максимальним динамічним відхиленням. САР базової структури в сталих режимах не виходить за рамки зони неважливих відхилень.

Після проведення процедури оптимізації параметрів ПІ-регулятора коефіцієнт передачі зменшився на 104%, час ізодрому збільшився на 100%, інтегральний критерій зменшився на 24%. Після проведення процедури оптимізації параметрів ПІД-регулятора коефіцієнт передачі збільшився на 46%, час ізодрому зменшився на 1%, час упередження зменшився на 43%, інтегральний критерій зменшився на 45%.

Введення до алгоритму регулювання Д-складової призвело до зменшення інтегрального критерію на 58%.

САР підвищеної динамічної точності задовольняє гранично припустимим вимогам. Після підвищення динамічної точності САР інтегральний критерій зменшився на 21%, максимальне динамічне відхилення зменшилося на 28%, час перехідного процесу зменшився на 37%.

САР підвищеної динамічної точності є грубою.

Оскільки САР підвищеної динамічної точності дає суттєве покращення показників якості регулювання у порівнянні з САР базової структури, тому САР підвищеної динамічної точності використовувати є доцільним (рис. 8, табл. 2).

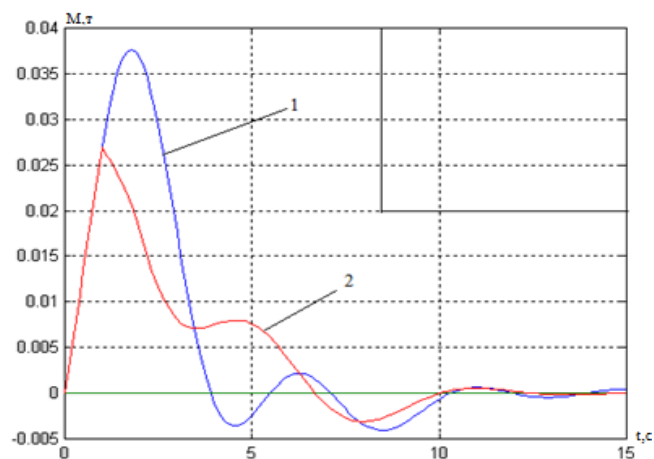


Рисунок 8 – Результати порівняння якості роботи САР базової структури (1) і САР підвищеної динамічної точності (2)

Таблиця 2 – Результати порівняння варіантів САР

Алгоритм регулювання	Прямі показники якості		Критерій
	$\Delta M^{\text{МАКС}}$	$T_{\text{пп}}, \text{с}$	
ПІД	0,0376	2,9	0,099
Інваріантна	0,027	1,83	0,078

Висновки

Оскільки зерно є стратегічним продуктом держави і експортується за кордон, дуже важливим є забезпечення умов його транспортування, в основному водним транспортом і збереження його споживних властивостей.

Технологічний процес завантаження суден зерном вимагає якомога більшої стабільності за умови заданої продуктивності поточно-транспортної системи.

Для забезпечення високої ефективності процесу завантаження суден зерном ним треба керувати з використанням сучасних засобів автоматизації.

Автоматизація процесу завантаження суден зерном є актуальним завданням.

Розглянуто технологічний процес витоку зерна з підвагового бункера.

Як об'єкт керування розглянуто підваговий бункер.

Розроблено параметризовану, параметричну та координатну схему об'єкту керування.

Конкретизовано основні регламенти.

Проведено структурну і параметричну ідентифікацію моделі каналу перетворення дій об'єкта регулювання.

Розроблено і параметрично оптимізовано алгоритми регулювання.

Вибрано технічні засоби, за рахунок яких можна провести модернізацію обладнання.

Розроблено технічну структуру мікропроцесорного ядра системи керування процесом витоку зерна з підвагового бункера, здійснений вибір промислового контролера та його блоків вводу/виводу.

В середовищі CoDeSys розроблені програми, які реалізують алгоритми логічного керування та регулювання.

При виконанні роботи в середовищі SCADA-системи WinCCFlexible розроблено програмне забезпечення АРМ оператора і наладчика САК процесом витоку зерна з підвагового бункера.

Розроблено варіант комплексу технічної документації САК.

Розглянуто питання техніки безпеки при монтажі, налагодженні та експлуатації розробленої системи.

Список використаних джерел

1. Патент Казахстана на изобретение № 26500 Способ непрерывного дозирования сыпучих материалов (Електронний ресурс) / Еруланова А.Е., Шадрин Г.К. МПК G01G 11/00. Заявл. 24.11.2011 № 2011/1220.1. Опубл. 14.12.2012.- URL: <https://kz.patents.su/4-ip26500-sposob-nepreryvnogo-dozirovaniya-sypuchih-materialov.html>.

2. Ваги бункерні автоматичні ВБА-1100-Э-300 (електропривід) (Електронний ресурс) / Офіційний сайт компанії «Сімо».- URL: [https://simo.com.ua/ua/obladnannya/vesyi-bunkernyye-avtomaticheskije-vba-1100-e-300-\(elektroprivod\)](https://simo.com.ua/ua/obladnannya/vesyi-bunkernyye-avtomaticheskije-vba-1100-e-300-(elektroprivod)).

3. Ваговимірювальні комплекси та системи дозування (Електронний ресурс) / Офіційний сайт компанії «Інновіннпром».- URL: <https://innovinnprom.com/galuzevi-rishennya/bunkerni-vagy-2>.

4. Встановлення бункерних ваг для ТОВ «Ойлтранстерминал» (Електронний ресурс) / Офіційний сайт компанії «Grain capital».- URL: <https://zeo.ua/case/tov-oiltransterminal>.

5. Ваговий дозатор сипучих матеріалів продуктивністю 300 т/год (Електронний ресурс) / Офіційний сайт «Ваговимірювальні системи».- URL: <https://vis.ua/product/vesovoj-dozator-sypuchih-materialov-proizvoditelnostyu-300-t-ch/>.
6. Бункерний дозатор автоматичний АДМ-500/2, Дозатор інертних матеріалів (Електронний ресурс) / Офіційний сайт компанії «MFIN».- URL: https://mfin.com.ua/page_info.php?id=2277505&cat=prom.
7. Ваги бункерні «Норма-ТН1» (Електронний ресурс) / Офіційний сайт НВП «Механотрон».- URL: <https://mechanotron.com/?p=74>.
8. Бункерні ваги з автоматичним пробовідбірником (Електронний ресурс) / Офіційний сайт компанія «МКХП» <https://mkhp.com.ua/ru/glavnaj/>.
9. Бункерні ваги автоматичного переривчастого зважування (Електронний ресурс) / Офіційний сайт компанія «TORNUM» <https://www.tornum.com/uk/product/hopper-scale-dviu/>.
10. Михайлов В.О. Автоматизація процесу керування витоком зерна з підвісового бункера до лінії завантаження суден (рукопис) / Випускна робота бакалавра.- Одеса: ОНТУ, 2023.-169с.

References

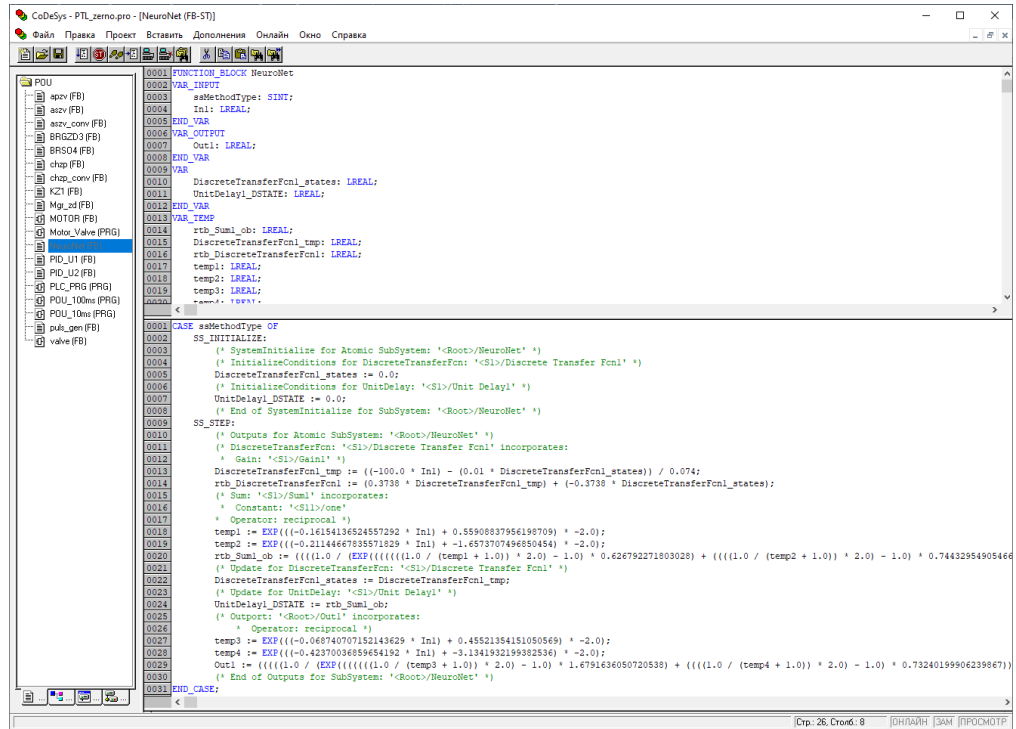
1. Patent Kazahstana na izobretenie № 26500 Sposob nepreryvnogo dozirovaniya sypuchih materialov (Elektronnij resurs) / Erulanova A.E., Shadrin G.K. MPK G01G 11/00. Zayavl. 24.11.2011 № 2011/1220.1. Opubl. 14.12.2012.- URL: <https://kz.patents.su/4-ip26500-sposob-nepreryvnogo-dozirovaniya-sypuchih-materialov.html>.
2. Vahy bunkerni avtomatychni VBA-1100-Э-300 (elektropryvid) (Elektronnyi resurs)/ Ofitsiyni sait kompanii «Simo».- URL: [https://simo.com.ua/ua/obladnannya/vesyi-bunkernye-avtomaticheskie-vba-1100-e-300-\(elektroprivod\)](https://simo.com.ua/ua/obladnannya/vesyi-bunkernye-avtomaticheskie-vba-1100-e-300-(elektroprivod)).
3. Vahovymiriualni komplekxy ta systemy dozuvannya (Elektronnyi resurs)/ Ofitsiyni sait kompanii «Innovinnprom».- URL: <https://innovinnprom.com/galuzevi-rishennya/bunkerni-vagy-2>.
4. Vstanovlennia bunkernykh vah dlia TOV «Oiltransterminal» (Elektronnyi resurs) / Ofitsiyni sait kompanii «Grain capital».- URL: <https://zeo.ua/case/tov-oiltransterminal>.
5. Vahovy dozator sypuchykh materialiv produktyvnistiu 300 t/hod (Elektronnyi resurs) / Ofitsiyni sait «Vahovymiriualni systemy».- URL: <https://vis.ua/product/vesovoj-dozator-sypuchih-materialov-proizvoditelnostyu-300-t-ch/>.
6. Bunkernyi dozator avtomatychnyi ADM-500/2, Dozator inertnykh materialiv (Elektronnyi resurs) / Ofitsiyni sait kompanii «MFIN».- URL: https://mfin.com.ua/page_info.php?id=2277505&cat=prom.
7. Vahy bunkerni «Norma-TN1» (Elektronnyi resurs) / Ofitsiyni sait NVP «Mekhanotron».- URL: <https://mechanotron.com/?p=74>.
8. Bunkerni vahy z avtomatychnym probovidbirnykom (Elektronnyi resurs) / Ofitsiyni sait kompaniia «MKKhP» <https://mkhp.com.ua/ru/glavnaj/>.
9. Bunkerni vahy avtomatychnoho pereryvchastoho zvazhuvannya (Elektronnyi resurs) / Ofitsiyni sait kompaniia «TORNUM» <https://www.tornum.com/uk/product/hopper-scale-dviu/>.
10. Mykhailov V.O. Avtomatyzatsiia protsesu keruvannia vytokom zerna z pidvisovoho bunkera do liniy zavantazhennia suden (rukopys) / Vypuskna robota bakalavra.- Odessa: ONTU, 2023.-169s.

Науковий керівник к.т.н, доцент Світий І.М.

Додаток В

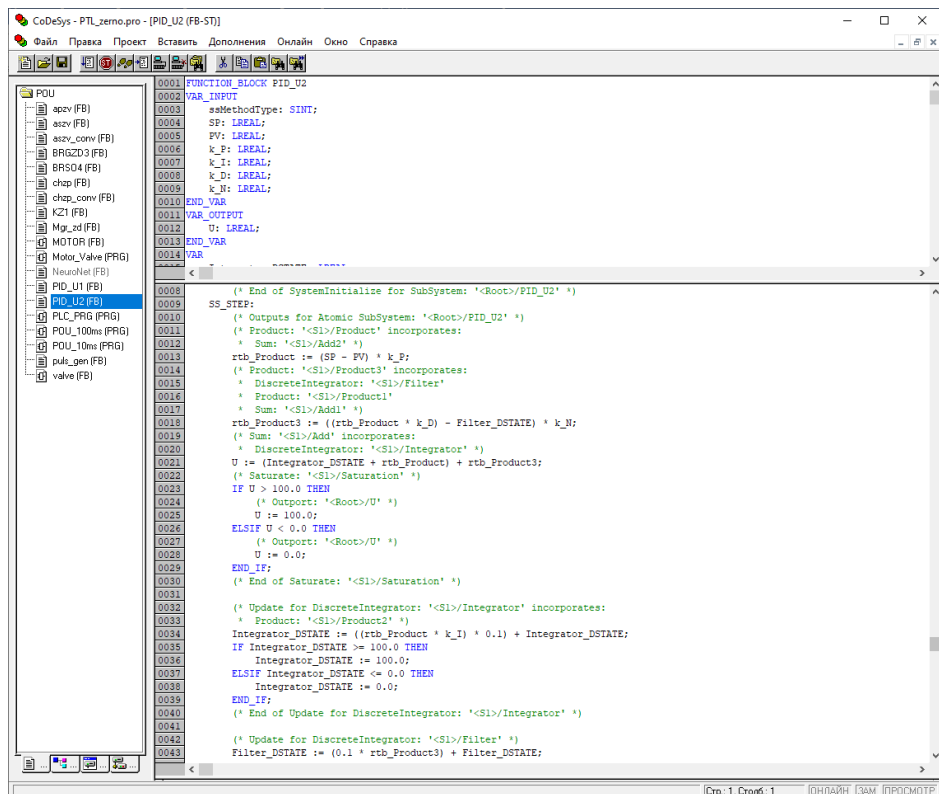
Вихідний код конвертованих модулів гарантуючого керування, регулятора та алгоритмів штучних нейронних мереж.

Вихідний текст модулю штучної нейронної мережі.



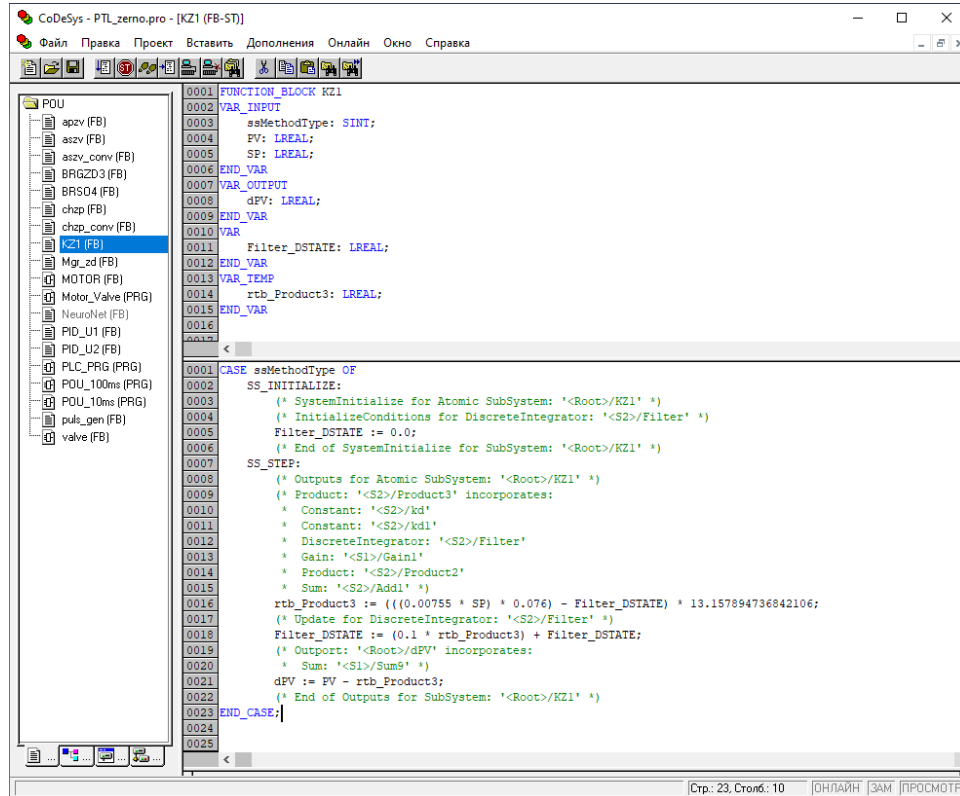
```
0001 FUNCTION_BLOCK NeuroNet
0002 VAR_INPUT
0003   sMethodType: SINT;
0004   In1: LREAL;
0005 END_VAR
0006 VAR_OUTPUT
0007   Out1: LREAL;
0008 END_VAR
0009 VAR
0010   DiscreteTransferFcn_states: LREAL;
0011   UnitDelay1_DSTATE: LREAL;
0012 END_VAR
0013 VAR_TEMP
0014   rtb_Sum1_ob: LREAL;
0015   DiscreteTransferFcn1_tmp: LREAL;
0016   rtb_DiscreteTransferFcn1: LREAL;
0017   temp1: LREAL;
0018   temp2: LREAL;
0019   temp3: LREAL;
0020   Sum: LREAL;
0021 END_VAR
0022
0023 (* SystemInitialize for Atomic SubSystem: 'Root/NeuroNet' *)
0024 (* InitializeConditions for DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn1' *)
0025 DiscreteTransferFcn_states := 0.0;
0026 (* InitializeConditions for UnitDelay: '<S1>/Unit Delay1' *)
0027 UnitDelay1_DSTATE := 0.0;
0028 (* End of SystemInitialize for SubSystem: 'Root/NeuroNet' *)
0029
0030 SS_STEP:
0031 (* Outputs for Atomic SubSystem: 'Root/NeuroNet' *)
0032 (* DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn1' incorporates:
0033   * Gain: '<S1>/Gain1' *)
0034 DiscreteTransferFcn1_tmp := ((-100.0 * In1) - (0.01 * DiscreteTransferFcn_states)) / 0.074;
0035 rtb_DiscreteTransferFcn1 := (0.3738 * DiscreteTransferFcn1_tmp) + (-0.3738 * DiscreteTransferFcn_states);
0036 (* Sum: '<S1>/Sum1' incorporates:
0037   * Constant: '<S1>/one'
0038   * Operator: reciprocal *)
0039 temp1 := EXP(((0.16154136524557292 * In1) + 0.5590837956198709) * -2.0);
0040 temp2 := EXP(((0.21144667635571929 * In1) + -1.4573707496859454) * -2.0);
0041 rtb_Sum1_ob := (((1.0 / EXP((((1.0 / (temp1 + 1.0) * 2.0) - 1.0) * 0.626792271803028) + (((1.0 / (temp2 + 1.0) * 2.0) - 1.0) * 0.74432954905466)
0042 (* Update for DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn1' *)
0043 DiscreteTransferFcn_states := DiscreteTransferFcn1_tmp;
0044 (* Update for UnitDelay: '<S1>/Unit Delay1' *)
0045 UnitDelay1_DSTATE := rtb_Sum1_ob;
0046 (* Output: '<Root>/Out1' incorporates:
0047   * Operator: reciprocal *)
0048 temp3 := EXP(((0.4687407152143629 * In1) + 0.45521354151050569) * -2.0);
0049 temp4 := EXP(((0.42370036595654192 * In1) + -3.1341932159382536) * -2.0);
0050 Out1 := (((1.0 / EXP((((1.0 / (temp3 + 1.0) * 2.0) - 1.0) * 1.6791636050720538) + (((1.0 / (temp4 + 1.0) * 2.0) - 1.0) * 0.73240199906239867))
0051 (* End of Outputs for SubSystem: 'Root/NeuroNet' *)
0052
0053 END_CASE;
```

Вихідний текст модулю ПІД регулятора.

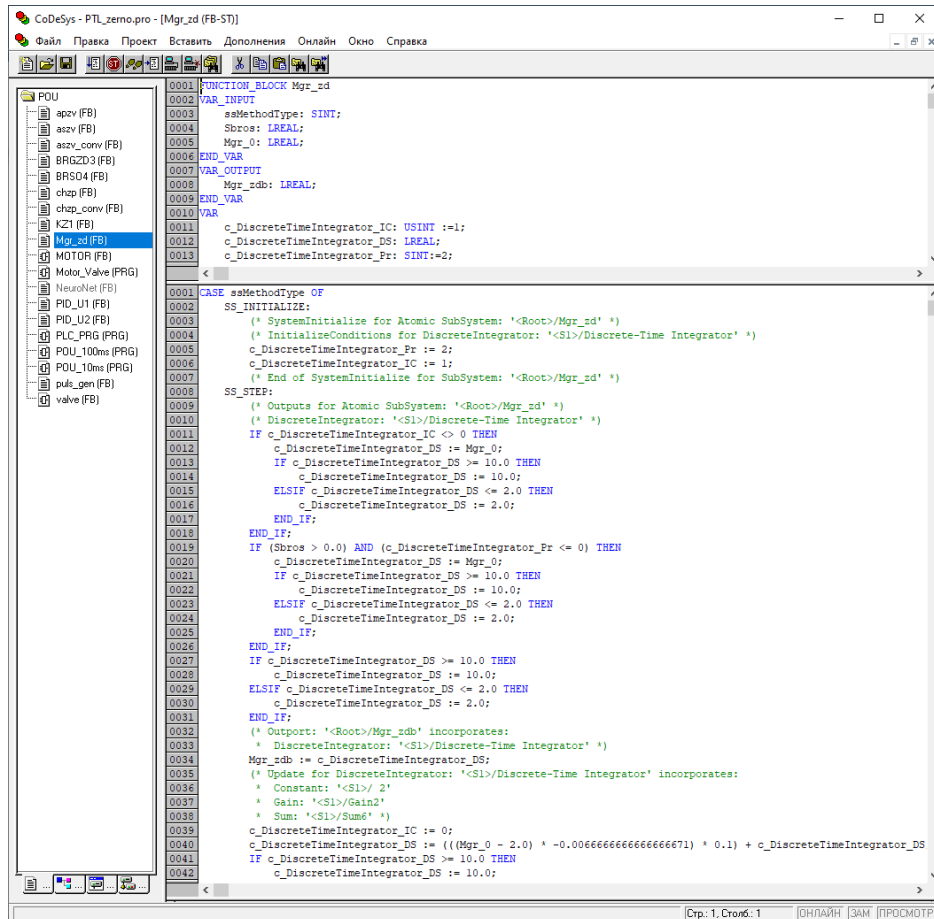


```
0001 FUNCTION_BLOCK PID_U2
0002 VAR_INPUT
0003   sMethodType: SINT;
0004   SP: LREAL;
0005   PV: LREAL;
0006   K_P: LREAL;
0007   K_I: LREAL;
0008   K_D: LREAL;
0009   K_N: LREAL;
0010 END_VAR
0011 VAR_OUTPUT
0012   U: LREAL;
0013 END_VAR
0014 VAR
0015   rtb_Product := (SP - PV) * K_P;
0016   DiscreteIntegrator: '<S1>/Filter';
0017   Product: '<S1>/Product1';
0018   Sum: '<S1>/Add1';
0019   rtb_Product3 := ((rtb_Product * K_D) - Filter_DSTATE) * K_N;
0020   DiscreteIntegrator: '<S1>/Integrator';
0021   U := (Integrator_DSTATE + rtb_Product) + rtb_Product3;
0022   Saturate: '<S1>/Saturation';
0023   IF U > 100.0 THEN
0024     (* Output: '<Root>/U' *)
0025     U := 100.0;
0026   ELSIF U < 0.0 THEN
0027     (* Output: '<Root>/U' *)
0028     U := 0.0;
0029   END_IF;
0030   (* End of Saturate: '<S1>/Saturation' *)
0031
0032 (* Update for DiscreteIntegrator: '<S1>/Integrator' incorporates:
0033   * Product: '<S1>/Product2' *)
0034 Integrator_DSTATE := ((rtb_Product * K_I) * 0.1) + Integrator_DSTATE;
0035 IF Integrator_DSTATE := 100.0 THEN
0036   Integrator_DSTATE := 100.0;
0037 ELSIF Integrator_DSTATE <= 0.0 THEN
0038   Integrator_DSTATE := 0.0;
0039 END_IF;
0040 (* End of Update for DiscreteIntegrator: '<S1>/Integrator' *)
0041
0042 (* Update for DiscreteIntegrator: '<S1>/Filter' *)
0043 Filter_DSTATE := (0.1 * rtb_Product3) + Filter_DSTATE;
```

Вихідний текст модулю коригуючого зв'язку.



Вихідний текст модулю задатчика.



Вихідний текст модулю БРГЗД

```
CoDeSys - PTL_zerno.pro - [BRGZD3 (FB-ST)]
Файл  Правка  Проект  Вставить  Дополнения  Онлайн  Окно  Справка

POU
├─ apzv (FB)
├─ aszv (FB)
├─ aszv_conv (FB)
├─ BRGZD3 (FB)
├─ BRSO4 (FB)
├─ chap (FB)
├─ chap_conv (FB)
├─ K21 (FB)
├─ Mpr_sd (FB)
├─ MOTOR (FB)
├─ Motor_Valve (PRG)
├─ NeuroNet (FB)
├─ PID_U1 (FB)
├─ PID_U2 (FB)
├─ PLC_PRG (PRG)
├─ POU_100ms (PRG)
├─ POU_10ms (PRG)
├─ pule_gen (FB)
└─ valve (FB)

0001 FUNCTION_BLOCK BRGZD3
0002 VAR_INPUT
0003   sMethodType: SINT;
0004   X: LREAL;
0005   Xnp: LREAL;
0006   T: LREAL;
0007   Pz: LREAL;
0008   Gx_p: LREAL;
0009   Gx: LREAL;
0010 END_VAR
0011 VAR_OUTPUT
0012   Xadd: LREAL;
0013 END_VAR
0014 VAR
0015   UD_DSTATE: LREAL;
0016   b_Sqrt: LREAL;
0017   LookupTableIn_data: ARRAY [0..1000] OF LREAL := 2.866515718791946E-7, 3.0189646252084903E-7,
0018     3.179213661852819E-7, 3.3476450827361839E-7, 3.5244589917642519E-7, 3.710674079633336E-7,
0019     3.9061285431832642E-7, 4.1148083643931E-7, 4.32721041861702E-7, 4.5538196484073189E-7, 4.7918327659032045E-7,
0020     5.04179883575366E-7, 5.3042820297509489E-7, 5.5799124320978274E-7, 5.869287644663828E-7,
0021     6.1730737200919884E-7, 6.491956428613363E-7, 6.826652525616643E-7, 7.1779110694690021E-7,
0022     7.5465147914637377E-7, 7.9332615197559734E-7, 8.3390656592291234E-7, 8.7647597292920517E-7,
0023     9.2112959616714359E-7, 9.6796479603273579E-7, 1.0170832422687061E-6, 1.0685910945459359E-6,
0024   <
0001 CASE sMethodType OF
0002   SS_INITIALIZE:
0003     (* ConstCode for Atomic SubSystem: '<Root>/BRGZD3' *)
0004     (* ConstCode for Sqrt: '<S1>/Sqrt' incorporates:
0005       * Constant: '<S1>/Constant4' *)
0006     b_Sqrt := 2.5066282746310002;
0007     (* End of ConstCode for SubSystem: '<Root>/BRGZD3' *)
0008     (* SystemInitialize for Atomic SubSystem: '<Root>/BRGZD3' *)
0009     (* InitializeConditions for UnitDelay: '<S2>/UD'
0010       *
0011       * Block description for '<S2>/UD':
0012       *
0013       * Store in Global RAM *)
0014     UD_DSTATE := 0.0;
0015     (* End of SystemInitialize for SubSystem: '<Root>/BRGZD3' *)
0016   SS_STEP:
0017     (* Outputs for Atomic SubSystem: '<Root>/BRGZD3' *)
0018     (* SampleTimeMath: '<S2>/TSamp' incorporates:
0019       * Sum: '<S1>/Sum'
0020       *
0021       * About '<S2>/TSamp':
0022       * y = u * K where K = 1 / ( w * Ts ) *)
0023     rtb_TSamp := (Xnp - X) * 100.0;
0024     (* Product: '<S1>/Product' incorporates:
0025       * Sum: '<S2>/Diff'
0026       * UnitDelay: '<S2>/UD'
0027       *
0028       * Block description for '<S2>/Diff':
0029       *
0030       * Add in CPU
0031       *
0032       * Block description for '<S2>/UD':
0033       *
0034       *
0035       *
0036       *
0037       *
0038       *
0039       *
0040       *
0041       *
0042       *
0043       *
0044       *
0045       *
0046       *
0047       *
0048       *
0049       *
0050       *
0051       *
0052       *
0053       *
0054       *
0055       *
0056       *
0057       *
0058       *
0059       *
0060       *
0061       *
0062       *
0063       *
0064       *
0065       *
0066       *
0067       *
0068       *
0069       *
0070       *
0071       *
0072       *
0073       *
0074       *
0075       *
0076       *
0077       *
0078       *
0079       *
0080       *
0081       *
0082       *
0083       *
0084       *
0085       *
0086       *
0087       *
0088       *
0089       *
0090       *
0091       *
0092       *
0093       *
0094       *
0095       *
0096       *
0097       *
0098       *
0099       *
0100       *
0101       *
0102       *
0103       *
0104       *
0105       *
0106       *
0107       *
0108       *
0109       *
0110       *
0111       *
0112       *
0113       *
0114       *
0115       *
0116       *
0117       *
0118       *
0119       *
0120       *
0121       *
0122       *
0123       *
0124       *
0125       *
0126       *
0127       *
0128       *
0129       *
0130       *
0131       *
0132       *
0133       *
0134       *
0135       *
0136       *
0137       *
0138       *
0139       *
0140       *
0141       *
0142       *
0143       *
0144       *
0145       *
0146       *
0147       *
0148       *
0149       *
0150       *
0151       *
0152       *
0153       *
0154       *
0155       *
0156       *
0157       *
0158       *
0159       *
0160       *
0161       *
0162       *
0163       *
0164       *
0165       *
0166       *
0167       *
0168       *
0169       *
0170       *
0171       *
0172       *
0173       *
0174       *
0175       *
0176       *
0177       *
0178       *
0179       *
0180       *
0181       *
0182       *
0183       *
0184       *
0185       *
0186       *
0187       *
0188       *
0189       *
0190       *
0191       *
0192       *
0193       *
0194       *
0195       *
0196       *
0197       *
0198       *
0199       *
0200       *
0201       *
0202       *
0203       *
0204       *
0205       *
0206       *
0207       *
0208       *
0209       *
0210       *
0211       *
0212       *
0213       *
0214       *
0215       *
0216       *
0217       *
0218       *
0219       *
0220       *
0221       *
0222       *
0223       *
0224       *
0225       *
0226       *
0227       *
0228       *
0229       *
0230       *
0231       *
0232       *
0233       *
0234       *
0235       *
0236       *
0237       *
0238       *
0239       *
0240       *
0241       *
0242       *
0243       *
0244       *
0245       *
0246       *
0247       *
0248       *
0249       *
0250       *
0251       *
0252       *
0253       *
0254       *
0255       *
0256       *
0257       *
0258       *
0259       *
0260       *
0261       *
0262       *
0263       *
0264       *
0265       *
0266       *
0267       *
0268       *
0269       *
0270       *
0271       *
0272       *
0273       *
0274       *
0275       *
0276       *
0277       *
0278       *
0279       *
0280       *
0281       *
0282       *
0283       *
0284       *
0285       *
0286       *
0287       *
0288       *
0289       *
0290       *
0291       *
0292       *
0293       *
0294       *
0295       *
0296       *
0297       *
0298       *
0299       *
0300       *
0301       *
0302       *
0303       *
0304       *
0305       *
0306       *
0307       *
0308       *
0309       *
0310       *
0311       *
0312       *
0313       *
0314       *
0315       *
0316       *
0317       *
0318       *
0319       *
0320       *
0321       *
0322       *
0323       *
0324       *
0325       *
0326       *
0327       *
0328       *
0329       *
0330       *
0331       *
0332       *
0333       *
0334       *
0335       *
0336       *
0337       *
0338       *
0339       *
0340       *
0341       *
0342       *
0343       *
0344       *
0345       *
0346       *
0347       *
0348       *
0349       *
0350       *
0351       *
0352       *
0353       *
0354       *
0355       *
0356       *
0357       *
0358       *
0359       *
0360       *
0361       *
0362       *
0363       *
0364       *
0365       *
0366       *
0367       *
0368       *
0369       *
0370       *
0371       *
0372       *
0373       *
0374       *
0375       *
0376       *
0377       *
0378       *
0379       *
0380       *
0381       *
0382       *
0383       *
0384       *
0385       *
0386       *
0387       *
0388       *
0389       *
0390       *
0391       *
0392       *
0393       *
0394       *
0395       *
0396       *
0397       *
0398       *
0399       *
0400       *
0401       *
0402       *
0403       *
0404       *
0405       *
0406       *
0407       *
0408       *
0409       *
0410       *
0411       *
0412       *
0413       *
0414       *
0415       *
0416       *
0417       *
0418       *
0419       *
0420       *
0421       *
0422       *
0423       *
0424       *
0425       *
0426       *
0427       *
0428       *
0429       *
0430       *
0431       *
0432       *
0433       *
0434       *
0435       *
0436       *
0437       *
0438       *
0439       *
0440       *
0441       *
0442       *
0443       *
0444       *
0445       *
0446       *
0447       *
0448       *
0449       *
0450       *
0451       *
0452       *
0453       *
0454       *
0455       *
0456       *
0457       *
0458       *
0459       *
0460       *
0461       *
0462       *
0463       *
0464       *
0465       *
0466       *
0467       *
0468       *
0469       *
0470       *
0471       *
0472       *
0473       *
0474       *
0475       *
0476       *
0477       *
0478       *
0479       *
0480       *
0481       *
0482       *
0483       *
0484       *
0485       *
0486       *
0487       *
0488       *
0489       *
0490       *
0491       *
0492       *
0493       *
0494       *
0495       *
0496       *
0497       *
0498       *
0499       *
0500       *
0501       *
0502       *
0503       *
0504       *
0505       *
0506       *
0507       *
0508       *
0509       *
0510       *
0511       *
0512       *
0513       *
0514       *
0515       *
0516       *
0517       *
0518       *
0519       *
0520       *
0521       *
0522       *
0523       *
0524       *
0525       *
0526       *
0527       *
0528       *
0529       *
0530       *
0531       *
0532       *
0533       *
0534       *
0535       *
0536       *
0537       *
0538       *
0539       *
0540       *
0541       *
0542       *
0543       *
0544       *
0545       *
0546       *
0547       *
0548       *
0549       *
0550       *
0551       *
0552       *
0553       *
0554       *
0555       *
0556       *
0557       *
0558       *
0559       *
0560       *
0561       *
0562       *
0563       *
0564       *
0565       *
0566       *
0567       *
0568       *
0569       *
0570       *
0571       *
0572       *
0573       *
0574       *
0575       *
0576       *
0577       *
0578       *
0579       *
0580       *
0581       *
0582       *
0583       *
0584       *
0585       *
0586       *
0587       *
0588       *
0589       *
0590       *
0591       *
0592       *
0593       *
0594       *
0595       *
0596       *
0597       *
0598       *
0599       *
0600       *
0601       *
0602       *
0603       *
0604       *
0605       *
0606       *
0607       *
0608       *
0609       *
0610       *
0611       *
0612       *
0613       *
0614       *
0615       *
0616       *
0617       *
0618       *
0619       *
0620       *
0621       *
0622       *
0623       *
0624       *
0625       *
0626       *
0627       *
0628       *
0629       *
0630       *
0631       *
0632       *
0633       *
0634       *
0635       *
0636       *
0637       *
0638       *
0639       *
0640       *
0641       *
0642       *
0643       *
0644       *
0645       *
0646       *
0647       *
0648       *
0649       *
0650       *
0651       *
0652       *
0653       *
0654       *
0655       *
0656       *
0657       *
0658       *
0659       *
0660       *
0661       *
0662       *
0663       *
0664       *
0665       *
0666       *
0667       *
0668       *
0669       *
0670       *
0671       *
0672       *
0673       *
0674       *
0675       *
0676       *
0677       *
0678       *
0679       *
0680       *
0681       *
0682       *
0683       *
0684       *
0685       *
0686       *
0687       *
0688       *
0689       *
0690       *
0691       *
0692       *
0693       *
0694       *
0695       *
0696       *
0697       *
0698       *
0699       *
0700       *
0701       *
0702       *
0703       *
0704       *
0705       *
0706       *
0707       *
0708       *
0709       *
0710       *
0711       *
0712       *
0713       *
0714       *
0715       *
0716       *
0717       *
0718       *
0719       *
0720       *
0721       *
0722       *
0723       *
0724       *
0725       *
0726       *
0727       *
0728       *
0729       *
0730       *
0731       *
0732       *
0733       *
0734       *
0735       *
0736       *
0737       *
0738       *
0739       *
0740       *
0741       *
0742       *
0743       *
0744       *
0745       *
0746       *
0747       *
0748       *
0749       *
0750       *
0751       *
0752       *
0753       *
0754       *
0755       *
0756       *
0757       *
0758       *
0759       *
0760       *
0761       *
0762       *
0763       *
0764       *
0765       *
0766       *
0767       *
0768       *
0769       *
0770       *
0771       *
0772       *
0773       *
0774       *
0775       *
0776       *
0777       *
0778       *
0779       *
0780       *
0781       *
0782       *
0783       *
0784       *
0785       *
0786       *
0787       *
0788       *
0789       *
0790       *
0791       *
0792       *
0793       *
0794       *
0795       *
0796       *
0797       *
0798       *
0799       *
0800       *
0801       *
0802       *
0803       *
0804       *
0805       *
0806       *
0807       *
0808       *
0809       *
0810       *
0811       *
0812       *
0813       *
0814       *
0815       *
0816       *
0817       *
0818       *
0819       *
0820       *
0821       *
0822       *
0823       *
0824       *
0825       *
0826       *
0827       *
0828       *
0829       *
0830       *
0831       *
0832       *
0833       *
0834       *
0835       *
0836       *
0837       *
0838       *
0839       *
0840       *
0841       *
0842       *
0843       *
0844       *
0845       *
0846       *
0847       *
0848       *
0849       *
0850       *
0851       *
0852       *
0853       *
0854       *
0855       *
0856       *
0857       *
0858       *
0859       *
0860       *
0861       *
0862       *
0863       *
0864       *
0865       *
0866       *
0867       *
0868       *
0869       *
0870       *
0871       *
0872       *
0873       *
0874       *
0875       *
0876       *
0877       *
0878       *
0879       *
0880       *
0881       *
0882       *
0883       *
0884       *
0885       *
0886       *
0887       *
0888       *
0889       *
0890       *
0891       *
0892       *
0893       *
0894       *
0895       *
0896       *
0897       *
0898       *
0899       *
0900       *
0901       *
0902       *
0903       *
0904       *
0905       *
0906       *
0907       *
0908       *
0909       *
0910       *
0911       *
0912       *
0913       *
0914       *
0915       *
0916       *
0917       *
0918       *
0919       *
0920       *
0921       *
0922       *
0923       *
0924       *
0925       *
0926       *
0927       *
0928       *
0929       *
0930       *
0931       *
0932       *
0933       *
0934       *
0935       *
0936       *
0937       *
0938       *
0939       *
0940       *
0941       *
0942       *
0943       *
0944       *
0945       *
0946       *
0947       *
0948       *
0949       *
0950       *
0951       *
0952       *
0953       *
0954       *
0955       *
0956       *
0957       *
0958       *
0959       *
0960       *
0961       *
0962       *
0963       *
0964       *
0965       *
0966       *
0967       *
0968       *
0969       *
0970       *
0971       *
0972       *
0973       *
0974       *
0975       *
0976       *
0977       *
0978       *
0979       *
0980       *
0981       *
0982       *
0983       *
0984       *
0985       *
0986       *
0987       *
0988       *
0989       *
0990       *
0991       *
0992       *
0993       *
0994       *
0995       *
0996       *
0997       *
0998       *
0999       *
1000       *
1001       *
1002       *
1003       *
1004       *
1005       *
1006       *
1007       *
1008       *
1009       *
1010       *
1011       *
1012       *
1013       *
1014       *
1015       *
1016       *
1017       *
1018       *
1019       *
1020       *
1021       *
1022       *
1023       *
1024       *
1025       *
1026       *
1027       *
1028       *
1029       *
1030       *
1031       *
1032       *
1033       *
1034       *
1035       *
1036       *
1037       *
1038       *
1039       *
1040       *
1041       *
1042       *
1043       *
1044       *
1045       *
1046       *
1047       *
1048       *
1049       *
1050       *
1051       *
1052       *
1053       *
1054       *
1055       *
1056       *
1057       *
1058       *
1059       *
1060       *
1061       *
1062       *
1063       *
1064       *
1065       *
1066       *
1067       *
1068       *
1069       *
1070       *
1071       *
1072       *
1073       *
1074       *
1075       *
1076       *
1077       *
1078       *
1079       *
1080       *
1081       *
1082       *
1083       *
1084       *
1085       *
1086       *
1087       *
1088       *
1089       *
1090       *
1091       *
1092       *
1093       *
1094       *
1095       *
1096       *
1097       *
1098       *
1099       *
1100       *
1101       *
1102       *
1103       *
1104       *
1105       *
1106       *
1107       *
1108       *
1109       *
1110       *
1111       *
1112       *
1113       *
1114       *
1115       *
1116       *
1117       *
1118       *
1119       *
1120       *
1121       *
1122       *
1123       *
1124       *
1125       *
1126       *
1127       *
1128       *
1129       *
1130       *
1131       *
1132       *
1133       *
1134       *
1135       *
1136       *
1137       *
1138       *
1139       *
1140       *
1141       *
1142       *
1143       *
1144       *
1145       *
1146       *
1147       *
1148       *
1149       *
1150       *
1151       *
1152       *
1153       *
1154       *
1155       *
1156       *
1157       *
1158       *
1159       *
1160       *
1161       *
1162       *
1163       *
1164       *
1165       *
1166       *
1167       *
1168       *
1169       *
1170       *
1171       *
1172       *
1173       *
1174       *
1175       *
1176       *
1177       *
1178       *
1179       *
1180       *
1181       *
1182       *
1183       *
1184       *
1185       *
1186       *
1187       *
1188       *
1189       *
1190       *
1191       *
1192       *
1193       *
1194       *
1195       *
1196       *
1197       *
1198       *
1199       *
1200       *
1201       *
1202       *
1203       *
1204       *
1205       *
1206       *
1207       *
1208       *
1209       *
1210       *
1211       *
1212       *
1213       *
1214       *
1215       *
1216       *
1217       *
1218       *
1219       *
1220       *
1221       *
1222       *
1223       *
1224       *
1225       *
1226       *
1227       *
1228       *
1229       *
1230       *
1231       *
1232       *
1233       *
1234       *
1235       *
1236       *
1237       *
1238       *
1239       *
1240       *
1241       *
1242       *
1243       *
1244       *
1245       *
1246       *
1247       *
1248       *
1249       *
1250       *
1251       *
1252       *
1253       *
1254       *
1255       *
1256       *
1257       *
1258       *
1259       *
1260       *
1261       *
1262       *
1263       *
1264       *
1265       *
1266       *
1267       *
1268       *
1269       *
1270       *
1271       *
1272       *
1273       *
1274       *
1275       *
1276       *
1277       *
1278       *
1279       *
1280       *
1281       *
1282       *
1283       *
1284       *
1285       *
1286       *
1287       *
1288       *
1289       *
1290       *
1291       *
1292       *
1293       *
1294       *
1295       *
1296       *
1297       *
1298       *
1299       *
1300       *
1301       *
1302       *
1303       *
1304       *
1305       *
1306       *
1307       *
1308       *
1309       *
1310       *
1311       *
1312       *
1313       *
1314       *
1315       *
1316       *
1317       *
1318       *
1319       *
1320       *
1321       *
1322       *
1323       *
1324       *
1325       *
1326       *
1327       *
1328       *
1329       *
1330       *
1331       *
1332       *
1333       *
1334       *
1335       *
1336       *
1337       *
1338       *
1339       *
1340       *
1341       *
1342       *
1343       *
1344       *
1345       *
1346       *
1347       *
1348       *
1349       *
1350       *
1351       *
1352       *
1353       *
1354       *
1355       *
1356       *
1357       *
1358       *
1359       *
1360       *
1361       *
1362       *
1363       *
1364       *
1365       *
1366       *
1367       *
1368       *
1369       *
1370       *
1371       *
1372       *
1373       *
1374       *
1375       *
1376       *
1377       *
1378       *
1379       *
1380       *
1381       *
1382       *
1383       *
1384       *
1385       *
1386       *
1387       *
1388       *
1389       *
1390       *
1391       *
1392       *
1393       *
1394       *
1395       *
1396       *
1397       *
1398       *
1399       *
1400       *
1401       *
1402       *
1403       *
1404       *
1405       *
1406       *
1407       *
1408       *
1409       *
1410       *
1411       *
1412       *
1413       *
1414       *
1415       *
1416       *
1417       *
1418       *
1419       *
1420       *
1421       *
1422       *
1423       *
1424       *
1425       *
1426       *
1427       *
1428       *
1429       *
1430       *
1431       *
1432       *
1433       *
1434       *
1435       *
1436       *
1437       *
1438       *
1439       *
1440       *
1441       *
1442       *
1443       *
1444       *
1445       *
1446       *
1447       *
1448       *
1449       *
1450       *
1451       *
1452       *
1453       *
1454       *
1455       *
1456       *
1457       *
1458       *
1459       *
1460       *
1461       *
1462       *
1463       *
1464       *
1465       *
1466       *
1467       *
1468       *
1469       *
1470       *
1471       *
1472       *
1473       *
1474       *
1475       *
1476       *
1477       *
1478       *
1479       *
1480       *
1481       *
1482       *
1483       *
1484       *
1485       *
1486       *
1487       *
1488       *
1489       *
1490       *
1491       *
1492       *
1493       *
1494       *
1495       *
1496       *
1497       *
1498       *
1499       *
1500       *
1501       *
1502       *
1503       *
1504       *
1505       *
1506       *
1507       *
1508       *
1509       *
1510       *
1511       *
1512       *
1513       *
1514       *
1515       *
1516       *
1517       *
1518       *
1519       *
1520       *
1521       *
1522       *
1523       *
1524       *
1525       *
1526       *
1527       *
1528       *
1529       *
1530       *
1531       *
1532       *
1533       *
1534       *
1535       *
1536       *
1537       *
1538       *
1539       *
1540       *
1541       *
1542       *
1543       *
1544       *
1545       *
1546       *
1547       *
1548       *
1549       *
1550       *
1551       *
1552       *
1553       *
1554       *
1555      
```