

**Міністерство освіти і науки України**

**Донецький національний університет економіки і торгівлі  
імені Михайла Туган-Барановського**

**Хорольський В. П.,  
Коренець Ю. М.**

# **АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ**

**Підручник**

**Кривий Ріг  
2022**

**УДК 664.512.011.56.681.3**

**X 81**

Рекомендовано до видання Вченою радою Донецького національного університету економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського (протокол № 15 від 24.06.2021 р.).

**Рецензенти:**

д-р техн. наук, професор В. П. Щокін (Криворізький національний університет, директор НДГРІ);

д-р техн. наук, професор А. В. Погребняк (Університет митної справи та фінансів, м. Дніпро);

д-р техн. наук, професор С. О. Жуков (Академія гірничих наук, м. Кривий Ріг).

**Хорольський, В. П.**

**X 81 Автоматизація виробничих процесів:** підручник / В. П. Хорольський, Ю. М. Коренець. – Кривий Ріг: [ДонНУЕТ], 2022. – 400 с.

**ISBN 978-966-385-388-8**

У підручнику викладено основи теорії автоматичного керування технологічними процесами харчових виробництв.

Наведені принципи керування безперервними, дискретно-безперервними, дискретними технологічними процесами, розроблені на загальній теоретичній основі з використанням методів теорії систем, прийняття рішень і теорії робастних, адаптивних та нечітких множин системи керування складними нелінійними динамічними системами.

В четвертій та п'ятій частинах підручника викладено основи сучасних систем керування траєкторією виробництва продукції, розглянуто методи проектування інтелектуальних систем управління підприємствами на базі робототехнологічних комплексів та робототехнологічних інтенсифікаторів. У шостому розділі підручника розглянуто питання самостійної та індивідуальної роботи здобувачів вищої освіти.

Книга адресована здобувачам вищої освіти, науково-педагогічним працівникам та фахівцям, які працюють у сферах галузевого й енергетичного машинобудування харчових виробництв, харчових технологій та інженерії.

**УДК 664.512.011.56.681.3**

**ISBN 978-966-385-388-8**

**© В. П. Хорольський, Ю. М. Коренець, 2022**

**© ДонНУЕТ, 2022**

*Коли відходять найкращі вчителі, їх студенти можуть сказати:  
«Це ми зробили самі»*

*(Річард К. Дорф.)*

**Автори підручника**

**1 ХОРОЛЬСЬКИЙ ВАЛЕНТИН ПЕТРОВИЧ** - доктор технічних наук, професор, автор більше 400 наукових праць з яких 12 монографій, три посібника, автор 124 авторських свідоцтв і патентів, загальний педагогічний стаж в закладах вищої освіти 58 років.

**2. КОРЕНЕЦЬ ЮРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ**- старший викладач, автор більше 60 наукових праць, із яких 5 монографій, три посібника, підручник та 2 патенти.

## **СПИСОК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ І ПОЗНАЧЕНЬ**

**АВП-** автоматизація виробничих процесів  
**АдСУ-** адаптивна система управління  
**АРМ-** автоматизоване робоче місце  
**АР-** автоматичний регулятор  
**АСУП-** автоматизована система управління підприємством  
**АСУТП-** автоматизована система управління технологічним процесом  
**АСНКТП-** автоматизована система нечіткого керування технологічним процесом.  
**АСР-** автоматизована система регулювання.  
**АЦП-** аналого-цифровий перетворювач  
**БД-** база даних  
**БОД-** база оперативних даних  
**БЗ-** база знань  
**БДК-** блок дистанційного керування  
**БП-** база прецедентів  
**ВІС-** велика інтегральна схема  
**ВМ-** виконавчий механізм  
**ВП-** вимірювальний прилад  
**ВР-** верхній рівень  
**ГА** - генетичний алгоритм  
**ДЗ-** дискретна змінна  
**ДКР-** дослідно-конструкторська робота  
**ДР-** диференціальне рівняння  
**ДСАК-** дискретна система автоматичного керування  
**ДСАР-** дискретна система автоматичного регулювання  
**ДСП-** Державна система промислових приладів і засобів автоматизації  
**ІСУ-** інтелектуальна система управління  
**ЗВ-** засіб вимірювання  
**ЗЗ-** зворотний зв'язок  
**ЗЗП-** зовнішній запам'ятовувальний пристрій  
**ЗОТ-** засоби обчислювальної техніки  
**ЗП-** задавальний пристрій  
**ЗПЗ-** загальне програмне забезпечення  
**ПоП-** промисловий інтернет речей  
**ІСУ-** інтелектуальна система управління  
**ІС** інтелектуальна система  
**ІШ-** інформаційна шина  
**КК-** критерій керування  
**ЛК-** локальне керування  
**ЛКС-** локальний контроль і сигналізація  
**ЛШК-** локальна шина керування (Faldbus)  
**МІКРО-ЕОМ-** мікро ЕОМ  
**МП-** мікропроцесор  
**МПАС-** мікропроцесорна автоматизована система  
**МПК-** мікропроцесорний контролер  
**МПС-** мікропроцесорна система  
**МЦП-** модуль центрального процесора  
**НК-** нейрокомп'ютер  
**НМ-** нейромережа  
**ОЗП-** оперативний запам'ятовувальний пристрій  
**ОК-** об'єкт керування  
**ОР-** об'єкт регулювання

ОПР- особа, що приймає рішення  
ОПС-операторська станція  
ПАЗ- протиаварійний захист  
ПВ- пристрій виведення  
ПВВ- пристрій введення  
ПдП-підсилювач перетворювач  
ПЕП- пневмоелектричний перетворювач  
ПЗ- програмне забезпечення  
ПЗЗ- пристрій зворотного зв'язку  
ПЗО- пристрій зв'язку з об'єктом  
ПЗП- постійний запам'ятовувальний пристрій  
ПК- персональний комп'ютер  
ПОТ- пульт оператора технолога  
ПЦК- пряме цифрове керування  
Р- регулятор  
РО- регулювальний орган  
РС- робоча станція  
СА- система автоматизації  
САК- система автоматичного керування  
САПР- система автоматизованого проектування  
СК- система керування  
СПЗ-спеціальне програмне забезпечення  
СК- супервізорне керування  
С-суматор  
СНЛ- система управління з нечіткою логікою  
СР- супервізорне регулювання  
ТЕП- техніко-економічний показник  
ТЕХ- технологія  
ТЗА- технічні засоби автоматизації  
ТО- технологічний об'єкт  
ТОК- технологічний об'єкт керування  
ТП- технологічний процес  
ФС- функціональна структура  
ФЧХ-фазо-частотна характеристика  
ЦАП- цифро-аналоговий перетворювач  
ЦВП- цифровий-вимірювальний прилад  
ЦК- централізований контроль  
ЦОМ- цифрова-обчислювальна машина  
ЦОТ- цифрова-обчислювальна техніка.  
ЦФ- цифровий фільтр  
ЧЕ- чутливий елемент  
ЧЕП- частотний електронний перетворювач  
ШНМ-штучна нейронна мережа  
ХМ-холодильна машина  
Список прийнятих скорочень і позначень

3

<b>ПЕРЕДМОВА</b>	10
<b>РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ</b>	12
Тема 1. Загальні питання про автоматизацію виробничих процесів	12
1.1. Основні поняття та визначення теорій автоматизації, керування та управління підприємством	12
1.2. Основні поняття та визначення сучасних систем управління підприємством	15
1.3. Технологічний об'єкт керування	14
1.4. Основні поняття та синтез систем керування	17
Контрольні запитання	
Тема 2. Системи автоматичного регулювання	24
2.1. Загальна структура системи автоматичного регулювання...	24
2.2. Сутність принципу Понселе	21
2.3. Сутність принципу Ползунова-Уатта	22
2.4. Комбінований (замкнуто-розімкнутий) принцип регулювання	23
2.5. Дослідження систем автоматизованого регулювання	24
Контрольні запитання.....	24
Тема 3. Математичні моделі систем автоматизації	32
3.1. Диференціальні рівняння фізичних систем	32
3.2. Лінеаризація фізичних систем	36
3.3. Перетворення Лапласа ...	39
Контрольні запитання.....	39
Тема 4. Передавальні функції лінійних систем	47
4.1. Загальні положення теорії	47

4.2. Структурні схеми	55
4.3. Синтез структурних схем	58
4.4. Моделі у вигляді сигнальних графів ...	
Контрольні запитання.....	61
<b>Тема 5. Типові динамічні ланки автоматичних систем, критерії стійкості, регулятори</b>	<b>67</b>
5.1. Подання елементів ланками	67
5.2. Ланки лінійних автоматичних систем регулювання	67
5.3. З'єднання ланок та алгебричні структурні схеми автоматичних систем	74
5.4. Стійкість динамічних систем	75
5.5. Критерії стійкості	77
5.6. Автоматичні регулятори в системах керування виробництвом продуктів харчування	
Контрольні запитання.....	87
<b>Тема 6. Цифрові системи керування. Основи теорії</b>	<b>92</b>
6.1. Принципи побудови цифрових систем автоматизації харчових виробництв	92
6.2. Синтез цифрових систем керування технологічними процесами харчової промисловості	94
<b>Контрольні запитання</b>	
<b>Тема 7. Мікропроцесорні системи керування складними технологічними процесами виробництва продуктів</b>	<b>103</b>
7.1. Основи теорії мікропроцесорних систем керування технологічними процесами харчових виробництв	103
7.2. Нейрокомп'ютери в системах керування виробництвом продуктів харчування	108
7.3. Концепції побудови систем мікропроцесорного керування технологічними процесами харчових виробництв	111
7.4. Розподіленні системи керування	
Контрольні запитання.....	118
<b>Тема 8. Основи теорії нечітких множин</b>	<b>125</b>

8.1. Теоретичні основи нечіткого керування	125
.....	
8.2. Теоретичні основи побудови нечітких систем автоматизованого управління підприємствами в харчовій промисловості	128
8.3. Основні операції нечіткої логіки та принцип роботи системи нечіткої логіки	132
<b>Контрольні запитання</b>	
<b>Тема 9. Теоретичні основи проєктування автоматизованих систем управління технологічними процесами виробництва смарт-продуктів</b>	
.....	144
9.1. АСУТП хлібозаводів з виробництва смарт –продуктів харчування	144
9.2. Задачі верхнього рівня управління в АСУ-АСУТП хлібозаводу	
з виробництва смарт-продуктів харчування	160
<b>Контрольні запитання</b>	
<b>РОЗДІЛ 2. АВТОМАТИЗАЦІЯ ДИСКРЕТНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ</b>	
.....	166
<b>Тема 10. Проєктування систем автоматизації дискретних технологічних процесів</b>	166
10.1. Етапи проєктування та склад проєктної документації	166
10.2. Системи автоматизації технологічних процесів	167
10.3. Принципові електричні схеми	175
10.4. Проєктування систем автоматизованого керування дискретними виробництвами на підприємствах харчової промисловості	175
10.5. Автоматизація типових об'єктів харчових виробництв	197
<b>Контрольні запитання</b>	
<b>Тема 11. Робасні системи автоматизованого керування</b>	198
11.1. Принципи побудови робасних систем автоматичного керування	198
11.2. Синтез робасних систем керування	
<b>Контрольні запитання</b>	203
<b>Тема 12. Адаптивні системи керування</b>	215
12.1. Принципи проєктування адаптивних систем керування виробництвом продуктів здорового харчування	215
12.2. Пошукові адаптивні системи керування	220
12.3. Безпошукові адаптивні системи керування	224
<b>Контрольні запитання</b>	228



<b>Тема 13. Комбіноване робасне і адаптивне керування виробництвом продуктів керування</b>	
.....	
<b>13.1 Принципи побудови комбінованих робасних і адаптивних систем автоматизації харчових виробництв</b>	
.....	228
Контрольні запитання	
<b>РОЗДІЛ 3. РОБОТОТЕХНОЛОГІЧНА АВТОМАТИКА</b>	
.....	233
<b>Тема 14. Робототехнологічні комплекси та робото технічні пристрої в АСУТП підприємств харчової промисловості ...</b>	233
<b>14.1. Основи робототехніки</b>	
.....	233
<b>14.2 Характеристики промислових роботів .....</b>	237
<b>14.3. Датчики в системах розпізнавання, технічного зору роботів і мехатронних пристроїв .....</b>	239
<b>14.4. Електропривід роботів та мехатронних систем</b>	
.....	242
<b>14.5. Теорія та практика мехатронних систем керування складними технологічними процесами виробництва продуктів здорового харчування .....</b>	243
Контрольні запитання	
<b>Тема 15. Автоматизовані системи управління підприємствами харчової промисловості</b>	
.....	252
<b>15.1 Автоматизовані системи управління підприємством та роботизованими процесами (АСУ-АСУТП-РТК) .....</b>	252
<b>15.2 Функції цифрового керування верхнім рівнем АСУ</b>	
.....	262
<b>15.3 Загальні принципи побудови Smart-підприємств харчової промисловості з робототехнологічними комплексами</b>	
Контрольні запитання.....	268
<b>РОЗДІЛ 4. АДАПТИВНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ</b>	
.....	271
<b>Тема 16. Алгоритмізація виробничих процесів харчових технологій</b>	
.....	271
<b>16.1. Ідентифікація складних технологічних процесів у харчовій промисловості .....</b>	271
<b>16.2. Оптимізація та ідентифікація підготовчих операцій виробництва хліба .....</b>	273
<b>16.3. Локальні системи автоматизованого керування виробництвом хліба .....</b>	283

16.4. <i>Інтелектуальна фабрика з виробництва хлібобулочних виробів</i>	
<i>Контрольні запитання</i>	
.....	304
<b>РОЗДІЛ 5. НЕЧІТКІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ</b>	320
.....	
<b>Тема 17. Системи нечіткого керування виробництвом продукції</b>	
.....	320
17.1. <i>Поняття фаззифікації та дефаззифікації. Нейронечіткі Регулятори</i>	
.....	320
17.2. <i>Автоматизовані системи виробництва копченої риби на базі нейронечітких регуляторів і робототехнологічних комплексів</i>	
<i>Контрольні запитання</i> .....	320
.....	
<b>Тема 18. Автоматизована система нечіткого керування виробництвом згущеного молока</b>	
.....	326
18.1. <i>Загальні проблеми автоматизації виробництва молочної продукції</i>	
.....	326
18.2. <i>Синтез нечіткого регулятора з лінгвістичним зворотним зв'язком</i>	
.....	337
18.3. <i>Вибір програмного забезпечення та мікропроцесорів для керування технологічним процесом випарювання молочних продуктів</i>	
<i>Контрольні запитання</i>	
.....	366
<b>Тема 19. Автоматизовані системи управління промисловими холодильниками</b>	
.....	352
19.1. <i>Інтелектуальні системи управління промисловими холодильниками</i> .....	352
19.2. <i>Нечітке керування процесами холодопостачання промислових холодильників</i>	
.....	357
19.3. <i>Нечітке керування холодозабезпеченням обладнання супермаркетів</i>	
.....	359
19.4. <i>Методи моніторингу обладнання холодильних систем промислових холодильників ...</i>	361

*Контрольні запитання...*

**РОЗДІЛ 6. САМОСТІЙНА РОБОТА СТУДЕНТА**

*Тема 20. Самостійна та індивідуальна робота здобувача вищої освіти.....*

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

.....

**366**

## ПЕРЕДМОВА

Дисципліна «Автоматизація виробничих процесів» введена до початкових планів підготовки бакалаврів в ДонНУЕТ імені Михайла Туган-Барановського за спеціальностями 133 «Галузеве машинобудування» й 142 «Енергетичне машинобудування», як загальнонаукова дисципліна, що складає один із важливих етапів у підготовці сучасних інженерів.

Автоматизація виробництва продукції відіграє важливу роль в системі забезпечення смарт-продуктами харчування населення України. На сучасному етапі розвитку суспільства автоматизація спонукає до створення безпечної, екологічно чистої харчової продукції в умовах впровадження автоматизованих систем керування, систем контролю, робототехнологічних комплексів та комп'ютерно-інтегрованих виробництв.

Системи автоматизації ґрунтуються на функціональних можливостях мікропроцесорних систем керування з використанням принципів адаптації, самоорганізації, розподіленого керування та програмних комплексів. Тому на сторінках підручника презентовані сучасні апаратні і програмні засоби мікропроцесорної техніки та описані їх функціональні можливості при управлінні технологічними процесами та організації автоматизованих робочих місць (АРМ) оператора - технолога). У підручнику детально розглянуті основні положення стандартизації та метрологічного забезпечення АСУТП й функціонування програмно-технічних комплексів обчислювальної техніки для керування технологічними процесами харчових виробництв. Використання програмно-керованого комплексу спрощує адаптацію до зміни умов виробництва і робить реальним еволюційне удосконалення виробництва технологічними процесами в основному за рахунок зміни програмного забезпечення (ПЗ). Одним із головних аспектів, що спонукають проєктантів до розробки автоматизації технологічних процесів є удосконалення технології обчислювальних процедур оброблення інформації при одночасному розширенню їх функціональних можливостей і підвищенню надійності, що економічно стимулює розробку технологічного обладнання з вбудованими системами керування та технологічними комплексами. Проблеми використання програмно-технічного комплексу (ПТК), АСУТП, мікропроцесорів, інтелектуальних датчиків та виконавчих механізмів, адаптивних регуляторів, робастних систем керування повинні бути вирішені технологами та спеціалістами з автоматизації технологічних об'єктів, які безпосередньо працюють на виробництві та в проєктно-конструкторських організаціях. При цьому від спеціалістів вимагається вміння спроектувати технологічні об'єкти та обладнання з урахуванням рівня автоматизації виробництва, складати вхідні умови до систем керування технологічними об'єктами. Отже, з метою розробки та впровадження систем керування типовими технологічними процесами харчових виробництв, необхідні знання принципів їх побудови та тенденції розвитку; освоєння методів діагностики технологічних об'єктів керування; розробки і використання моделей та алгоритмів керування функціональними схемами з використанням комп'ютерних нейронних комплексів, нечітких

регуляторів, агентських технологій та принципів роботи інтелектуальних підприємств.

Арсенал підходів, що використані в даному підручнику для вирішення наведених вище завдань, включає:

- фундаментальні методи аналізу керованості, гнучкості керованих процесів;
- теорію цифрових систем, теоретичні основи робастних і адаптивних систем, теорію нечітких множин і методи прийняття інтелектуальних рішень в умовах невизначеності;
- методи експертних і агентських систем в задачах управління смарт-підприємствами, принципи інтелектуального керування гнучкими виробничими системами з робототехнологічними комплексами.

Усе це дозволяє здобувачам вищої освіти і спеціалістам в галузі харчової та переробної промисловості одержувати базові знання, навички та вміння щодо розглянутих тем підручника.

Мета даного видання полягає в тому, щоб розглянути основні принципи побудови АСУТП та локальних мікропроцесорних систем автоматизації складних динамічних систем виробництв різної харчової продукції, відобразити їх сфери використання, а також стан автоматизації галузі на момент написання підручника.

Це видання розраховане на здобувачів вищої освіти, які не спеціалізуються в галузі автоматизованого інтелектуального керування (механіків, технологів, холодильщиків, теплотехніків тощо), але яким в процесі прийняття рішень в умовах виробництва смарт-продукції конче потрібні знання з означених проблем.

У підручнику викладені не лише загальні питання автоматизації, методи автоматизованого контролю технологічних параметрів, основи теорії автоматичного регулювання та оптимізації, але й новітні принципи цифрового керування, робототехніки, інтелектуального управління, нечіткого керування на базі нечітких нейромереж і т. п.

Матеріали книги базуються в багатьох випадках на відкритих джерелах, друкованих виданнях підручників та навчальних посібників, дисертаціях та авторефератах дисертацій й на деяких розробках авторів книги.

Текст підручника супроводжуються великою кількістю відповідних ілюстрацій, що пояснюють сформульовані ідеї та принципи, прикладів вирішення конкретних практичних задач із наведеними теоретичними та прикладними результатами.

Співавтором тем 3, 4 є старший викладач Т. В. Квітка.

Автори підручника висловлюють подяку рецензентам – докторам технічних наук, професорам В. П. Щокіну, А. В. Погребняку, С. О. Жукову – за цінні зауваження та рекомендації стосовно структури і змісту основних розділів.

Автори висловлюють подяку здобувачам вищої освіти Юлії Петрушиній та Дмитру Шамраю за практичну допомогу у підготовці видання.

# РОЗДІЛ 1.

## ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ

### Тема 1. Загальні питання про автоматику та автоматизацію виробничих процесів

#### *1.1. Основні поняття та визначення теорій автоматизації, керування та управління підприємством*

На сучасному етапі, в епоху розвитку систем цифрового управління підприємствами харчової та переробної галузей для виробництва безпечних продуктів здорового харчування, автоматизація розглядається як важливий напрямок розвитку Індустрії-4,0 в Україні.

Підприємство в ринкових умовах – відкрита велика соціально-технічна система, що пов'язана специфічними відношеннями з його зовнішнім середовищем та зацікавленими групами людей (за теорією систем).

Апарат управління, призначенням якого є забезпечення отримання прибутку в результаті виробничої діяльності, інформування та комунікація з людьми (теорія прийняття рішень) є основним атрибутом існування підприємства.

Підхід до управління з точки зору теорії систем дозволяє дати характеристику принципової моделі підприємства, під якою будемо розуміти цілеспрямований центр дій, де люди (кадровий потенціал) ставлять визначені цілі та виконують для їх досягнення дії з об'єктами виробництва, використовуючи при цьому матеріальний потенціал підприємства.

Центральним завданням сучасної комп'ютеризованої автоматизації виробництва підприємства харчової промисловості є створення систем контролю та інформаційного забезпечення й автоматизованого керування високоінтенсивними технологічними процесами і засобами виробництва, які виключають взаємодію ручної праці з продуктами харчування.

Для вирішення цих завдань необхідні конкретні знання виробництва, його технологій, а також знання технічних засобів автоматики, принципів і методів керування локальними виробничими системами, окремими стадіями, технологічними лініями та розподіленого управління підприємством в цілому.

Наука про загальні принципи і методи побудови автоматично діючих пристроїв і систем називається автоматикою.

*Автоматика* – це сукупність механізмів і пристроїв, діючих автоматично.

Як відомо, ефективність систем контролю та керування залежить від раціонального вибору функцій і типу технічних засобів. Функції систем контролю і керування будемо розділяти за призначенням на основні та допоміжні, а за змістом – на інформаційні, обчислювальні і керуючі.

До основних функцій відносять ті, які забезпечують досягнення цілей функціонування об'єкта керування (ОК) та/або обмін інформацією з суміжними автоматичними системами контролю (АСК) і системами автоматичного керування (САК). До допоміжних функцій відносять функції, спрямовані на

досягнення необхідного рівня точності, надійності та інших показників якості функціонування засобів контролю та керування.

*Функції керування* – це сукупність операцій та процедур, які забезпечують створення та реалізацію керованих впливів на ОК або САК.

*Інформаційні функції керування* – це сукупність операцій та процедур, які забезпечують одержання, обробку і представлення інформації про стан ОК або систем контролю і керування оперативному персоналу або до систем планування типу МРП (планування виробничих ресурсів), а також надання ним інформації про зовнішнє середовище.

Склад основних функцій системи керування визначається цілями її керування. До основних інформаційних функцій відносять:

- вимірювання та контроль технологічних параметрів;
- підготовку і передачу інформації в суміжні системи контролю та керування;
- розрахунок техніко-економічних показників (ТЕП) і показників якості смарт-продуктів харчування і т.п.

Склад допоміжних функцій визначається забезпеченням працездатності систем контролю та керування.

*Працездатним* називають стан, при якому значення усіх параметрів, що характеризують можливість системи виконувати свої функції, відповідають вимогам нормативно-технічної документації.

Ефективність роботи ОК значною мірою залежить від матеріальних та людських ресурсів, необхідних для забезпечення підтримки ОК і систем контролю та керування в працездатному стані впродовж усього терміну експлуатації.

Стан системи (об'єкта), при якому значення будь-якого параметра не відповідає вказаним вимогам, є *непрацездатним*.

Подію, яка характеризує порушення працездатності системи, будемо називати *відмовою*.

Функції системи, що керує працездатністю автоматизованого ОК, наступні:

- технічне діагностування;
- зміни (реконфігурація) структури об'єкта;
- аварійний захист;
- управління резервами;
- технічне обслуговування та ремонт.

Реконфігурація структури системи (об'єкта) передбачає збереження найменшої швидкості зниження її працездатності. Ця функція виконується шляхом пошуку варіантів допустимої структури, зміни зв'язків та режимів функціонування елементів системи, використання автоматичного захисту, що попереджає про аварійний стан ОК.

Функція управління резервами – введення додаткових (резервних) елементів, спрямованих на збереження працездатності об'єкту та контроль досягнутих результатів. У залежності від виду резерву розрізняють функціональне, технічне та алгоритмічне резервування.

Проведення робіт з обслуговування та ремонту об'єкту визначається стратегією, під якою будемо розуміти час, об'єм і методи проведення вказаних робіт. Технічне обслуговування та ремонт виконуються з урахуванням інформації про виконання функцій управління резервами. Автоматизація харчових виробництв базується на розвитку систем двох видів.

Перша – це місцева (локальна) автоматика, тобто система автоматизації апаратів, установок, механізмів, ліній, які реалізують функції автоматичного контролю і сигналізації, автоматичного регулювання, автоматичного пуску та зупинки технологічного обладнання, автоматичного захисту для певного етапу технологічного процесу. Автоматичний контроль та сигналізація призначені для виконання безперервного виміру, запису параметрів, які характеризують стан і роботу технологічного обладнання, а також для формування попереджувальних сигналів щодо відхилення цих сигналів від допустимих значень. Автоматичне регулювання підтримує стабільність або закономірність зміни регулюємих величин, що забезпечує безпечність, надійність й ефективність експлуатації технологічного обладнання. Автоматичний пуск і зупинка забезпечують запуск в дію технологічного обладнання по сигналу із пункту керування, але за наявності зовнішніх умов. При цьому зберігається послідовність операцій та координація їх між собою. Автоматичний захист захищає діюче обладнання від аварій та аварійних ситуацій. Аварії виводять діюче обладнання із ладу або частково, що призводить до виникнення аварійних ситуацій та втрати продуктивності виробничих систем.

При цьому створюють системи автоматичного керування (САК) та системи автоматичного регулювання (САР). Такі системи будемо називати одноконтурними. У залежності від ступеня участі оператора в процесі керування розглядають такі режими:

- автоматичне керування – автоматичний режим, при якому керування відбувається без участі оператора, але за його завданням та під його контролем;
- напівавтоматичне керування – напівавтоматичний режим (автоматизований режим), при якому реалізація основних командних операцій щодо керування надається оператору;
- ручне керування – ручний режим, при якому усі операції щодо керування виконуються оператором.

Автоматичне, автоматизоване та ручне керування забезпечує заданий порядок і послідовність пуску, роботи та зупинки механізмів та пристроїв, що приймають участь в процесі, шляхом введення відповідного блокування. У залежності від місця розташування апаратури керування в автоматичному і ручному режимах може бути місцевим (апаратура керування встановлюється безпосередньо біля обладнання) або дистанційним. Місцеве керування необхідне для введення системи в автоматичний режим з метою проведення ремонтів, налагодження та перевірки технологічних апаратів та систем керування. При цьому блокування та сигналізація необхідні персоналу для захисту обладнання і повинні діяти в місцевому режимі.

Системи автоматичного контролю та сигналізації виконують



вимірювання фізичних величин, тобто виконують операції вимірювання і встановлюють відповідність між результатом вимірювання і заданим значенням цієї величини, а також інформують операційний персонал про стан технологічного процесу (технологічна сигналізація) і стан обладнання (виробнича сигналізація).

Щодо призначення сигналізації, то остання розподіляється на робочу, попереджувальну та аварійну. Вибір виду сигналізації залежить від конкретних умов і характеру процесу. На підприємствах харчової промисловості система сигналізації проектується у вигляді пультів, щитів та сучасних мнемосхем процесу на базі, наприклад апаратури фірми Siemens[1,42]

## ***1.2. Основні поняття та визначення сучасних систем управління підприємством***

Системи управління відносяться до кібернетичних систем, тому що в основу їх роботи покладено принцип переробки інформації.

*Кібернетика* – це наука, яка вивчає загальні закони управління в різних системах: технічних, біологічних, економічних на основі переробки інформації в системах різної природи (в технологічних апаратах, суспільстві, тваринному світі тощо). Управління реалізується цілеспрямованою координацією діяльності різних елементів тієї чи іншої системи.

Кібернетику підрозділяють на три види: *технічну, економічну та біокібернетику*.

*Технічна кібернетика* вивчає технічні засоби (роботів та інші технічні пристрої), які можуть замінити людину-оператора в процесі керування складними технологічними процесами виробництва смарт-продуктів харчування або виробничими операціями. Автоматичні та автоматизовані системи керування є елементами технічної кібернетики. В основу усіх процесів управління покладені інформаційні процеси, що виникають в системі. Кожний об'єкт, що піддається управлінню, будемо розглядати як окрему систему. Отже, система – це сукупність елементів, які знаходяться у співвідношеннях і зв'язках один з одним, що утворює визначену цілісність та єдність. Кожна система складається із декількох певних підсистем.

Підсистемою називається частина системи, виокремлена за деякими ознаками. Наприклад, харчова промисловість є системою, до якої входять окремі елементи системи (галузі): хлібопекарна, м'ясопереробна, молочна, цукрова, пивоварна, сироварна і т.п., головним завданням яких є виробництво продуктів харчування.

У свою чергу, галузь можливо представити як систему, що складається із сукупності елементів, якими є підприємства. Будь-яка кібернетична система складається із двох підсистем: управлінської та такої, що піддається управлінню.

Управлінська підсистема – це така підсистема, що реалізує процес переробки інформації, одержуючи інформацію про стан системи, переробляючи її та генеруючи нову інформацію.

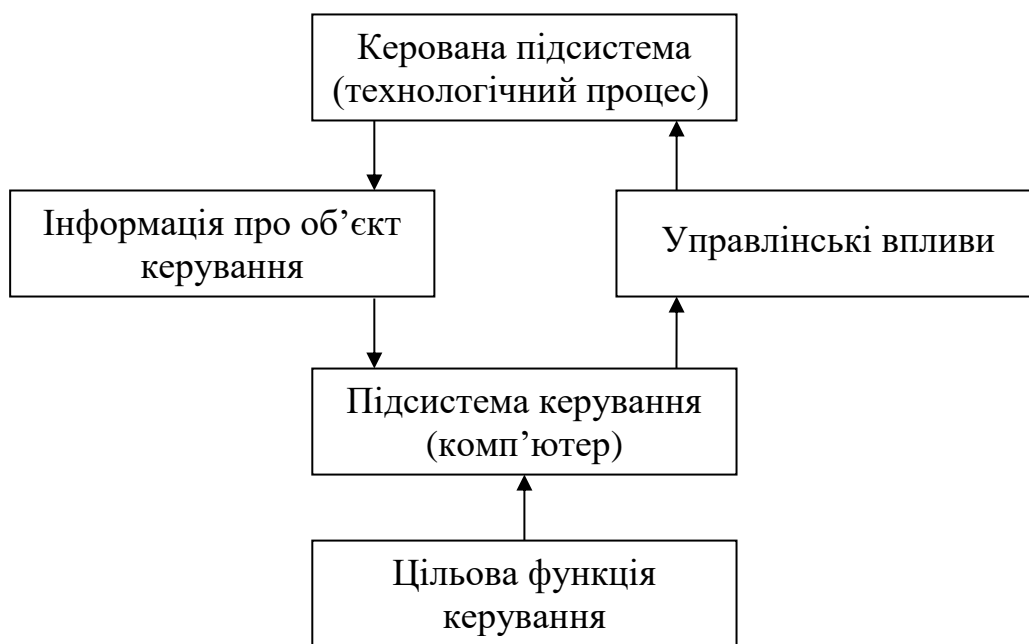
Підсистемою, що піддається управлінню, є підсистема, яка під дією даної інформації реалізує процеси функціонування усієї системи.

Системи управління представляють собою єдність управлінських підсистем та підсистем, що піддаються управлінню.

На рис. 1.1 наведено схему кібернетичної системи управління.

Класифікація кібернетичних систем виконується за багатьма ознаками, у тому числі й за ступенем складності.

Складність кібернетичної системи обумовлена двома факторами: загальною кількістю параметрів, що характеризують стан усіх її елементів, та складністю структури, яка характеризується загальним числом зв'язків між її елементами, та їх різновидами. Кібернетичні системи можна розділити на прості, складні та дуже складні.



**Рисунок 1.1. – Схема кібернетичної системи керування**

*Прості системи* – це системи, які не мають розгалуженої структури (відсутні ієрархічні рівні), з невеликою кількістю взаємозв'язаних і взаємодіючих елементів, які виконують більш складні функції.

*Складні системи* – це системи з розгалуженою системою та значною кількістю взаємозв'язаних і взаємодіючих елементів, які виконують більш складні функції. Зміни будь-яких елементів або зв'язків призводять до змін багатьох елементів системи (приклад – роботизована технологічна лінія з виробництва хлібобулочних виробів). Такі структури можна описувати нечіткими моделями.

*Дуже складні системи* – системи управління групою підприємств в умовах високої інфляції та невизначеності зовнішнього середовища, які повинні враховувати екологічну складову та виробляти продукцію на базі цифрових платформ, інформаційних комунікаційних технологій і *промислового Інтернету речей (ІоТ)*.

Зв'язками в кібернетиці є процеси одержання інформації, її збереження та передачі. Розрізняють два види зв'язків: прямі й зворотні.

*Прямі зв'язки* – зв'язки, які визначають впливи на об'єкт керування, від з'єднання елементів системи керування, при якому вхідні впливи елемента А передаються на вхід будь-якого елемента В.

У процесі керування необхідно знати, як реагує на сигнал керування об'єкт керування, тобто необхідний зворотний зв'язок В з А.

*Зворотний зв'язок* – зв'язок, що дозволяє виконати вибір керуючого впливу в залежності від стану системи (рис. 1.2).

Елемент А зв'язаний каналами прямого і зворотного зв'язку з елементом В. По каналу зворотного зв'язку елемент А одержує інформацію про зміни, які виникають в елементі В в результаті впливу одержаної від А інформації. Таким чином, за допомогою зворотного зв'язку одержують знання про результати керуючих і зовнішніх впливів на об'єкт, при цьому забезпечуються необхідні впливи вхідних та вихідних сигналів.



**Рисунок 1.2. – Схема прямого зв'язку**

Ідеал зворотного зв'язку полягає в тому, щоб використати відхилення системи (об'єкта) від визначеного стану для формування керованого впливу. Сигнали, які надходять по каналу зворотного зв'язку, забезпечують регулювання стану (діяльності) об'єкта.

Принцип зворотного зв'язку лежить в основі функціонування автоматичних регулюючих систем в техніці, природі, економіці та інших областях науки. На рис.1.3. наведена схема взаємодії об'єкта зі зворотним зв'язком.

У кібернетиці принципи самоорганізації та саморегулювання є базовими принципами, які визначають структуру систем, процеси керування в них та необхідну оптимальність функціонування.

### **1.3. Технологічний об'єкт керування**

*Технологічним процесом* будемо називати послідовну зміну в часі стану комплексу виробничого обладнання, матеріальних та енергетичних потоків, методів оброблення сировини або її переробки, напівфабрикатів для виготовлення смарт-продукції.

Під *технологічними об'єктами керування* (ТОК) розуміють сукупність технологічного обладнання і реалізованого на ньому за відповідними регламентами та інструкціями технологічного процесу виробництва.

*Технологічна установка* – це сукупність декількох взаємозв'язаних

апаратів та машин, в яких виконується певна технологічна операція. Прикладом можуть бути операції підготовки борошна, приготування розчинів солі, цукру тощо.

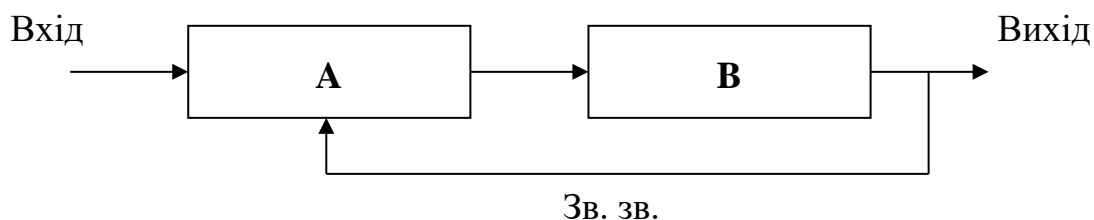
Технологічна лінія може мати ряд технологічних апаратів, агрегатів та установок, в яких виконується декілька технологічних процесів (наприклад, лінії приготування тіста, макаронних виробів, печива тощо).

На стадії проєктування систем керування технологічними процесами ТОК необхідний детальний аналіз. Він повинен бути системним, таким, що ґрунтується на дослідженнях технологічного процесу з питань технологічного оснащення та впровадження нових технологій, якості сировини і готової продукції, організації керування процесом.

У процесі аналізу технології виробництва продуктів харчування вивчають робочі характеристики конкретного виробництва, визначають параметри, які визначають процес, виявляють взаємозв'язки між ними. Сукупність дій (операцій) над вхідною сировиною, напівфабрикатами або складниками продуктів і продуктами, а також технологічні процеси, як набір технологічних дій і явищ, можна розглядати відповідно до теорії систем, як технологічні об'єкти або технології (ТЕХ).

Сучасні складні системи виробництва відносяться до дискретних і є такими, що чергуються в часі та є квазістаціонарними. Ці технології мають визначені структури входу та виходу, на які впливають фактори зовнішнього оточення й керовані впливи з метою оптимізації їх дій та одержання продукції смарт-харчування.

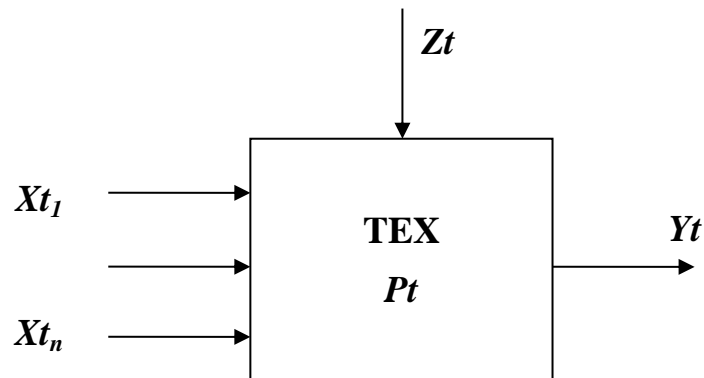
Це дозволяє проводити математичне моделювання для пошуку раціональних та, іноді, оптимальних критеріїв керування. Усі входи і виходи ТЕХ утворені матеріальними, фінансовими та інформаційними потоками даних. За рахунок цих потоків конкретна ТЕХ 1 зв'язується з іншими технологіями ТЕХ 2, ТЕХ 3, ..., ТЕХ N, у тому числі і з споживачами (ринкові відносини). При цьому слід розрізняти операційні (вхід, вихід) і керуючі (керування) потоки даних.. Схема об'єкта керування наведені на рис. 1.4.



**Рисунок 1.3. – Схема зворотного зв'язку (Зв. зв.)**

Щодо входу і виходу стан ТЕХ характеризується її основними технологічними показниками, сукупність яких утворює операційні потоки даних (кількість сировини, напівфабрикатів, готової продукції різного типу, їх загальні технологічні параметри й параметри складу та властивостей сировини, а також важливі економічні показники). Схема об'єкта керування наведена на рис.1.4

У загальному випадку компоненти потоків, наприклад вхідні дані, складуть відповідно  $N$ -простору вектора  $Xt$  ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) стан ТЕХ, який залежить від дискретного часу  $t$ , де  $t = 0, 1, 2, \dots, T$ .  $A$  – основна одиниця часу суттєвої зміни стану ТЕХ (квант часу), тобто  $Yt = F(X, t)$ .



**Рисунок 1.4. – Параметрична схема об'єкта керування**

Структуру ТЕХ можна описати  $M$ -вимірним простором вектора  $P = (P_1, P_2, \dots, P_M)$  зовнішніх і внутрішніх (таких, що визначаються споживчим ринком) структурних параметрів, які змінюються в часі (наприклад, параметри технологічного обладнання, коефіцієнти рівнянь фізико-хімічних, мікробіологічних, ферментативних та інших процесів; собівартість продукції, її ринкова ціна і т.п.). При цьому поточний стан ТЕХ (стан в даний момент часу  $t$ ) буде функцією як її зовнішніх та внутрішніх параметрів, так і часу, тобто  $Yt = F(X, P, t)$ . При цьому вектор структурних параметрів або не змінюється в часі, або змінюється значно повільніше відносно вектору стану. Вектор стану ТЕХ можна змінити за допомогою додаткового потоку даних (керування), зв'язаного з матеріальними, фінансовими та інформаційними ресурсами. Цей потік даних керування приведено у відповідність до  $L$  – мірного простору векторів керування  $Ut = (u_1, u_2, \dots, u_L)$ . При цьому поточна ТЕХ буде залежати також від вектора керування, тобто  $Yt = F(Xt, Pt, Ut, t)$ .

У загальному випадку, коли вектор керування впливає не лише на стан, а й на структуру ТЕХ, слід розглядати їх сумісну динаміку, тобто  $Yt = F(XtPtUt) = F2(Utt)$ .

На практиці, зазвичай, спочатку змінюють структуру, а потім керують станом ТЕХ, коли структура не залежить від керування.

Для повного опису необхідно ввести  $Q$ -мірний простір векторів  $Zt$  неконтрольованих збурень, або будемо називати їх перешкодами, діючих на ТЕХ. Перешкоди створюють ситуації інформаційної невизначеності ТЕХ. Фізична природа перешкод і механізмів їх впливу на ТЕХ може бути різною. Відповідно до системного підходу, можна виділити наступні типи впливів на структурні параметри ТЕХ ( $Y$ ): впливи на потік даних керування; примішування до вектору стану об'єкта керування

У загальному вигляді можливі випадки сумісного впливу перешкод на ТЕХ цілому. Тому поточний стан ТЕХ буде залежати як від контролюємих, так і від неконтролюємих величин тобто  $Y$ .

Оскільки потік перешкод є випадковим або невизначеним, то потік станів ТЕХ також випадковий. Або невизначений процес – процес за умови наявності перешкод.

#### ***1.4. Основні поняття та синтез систем керування***

*Технічне проектування* – це процес створення винаходів у системах автоматизованого керування, які дозволяють одержати інноваційні результати.

Мета проектування полягає у визначенні конфігурації системи, вимог, яким система повинна відповідати, і завданням основних параметрів, які задовольняють вимоги до системи.

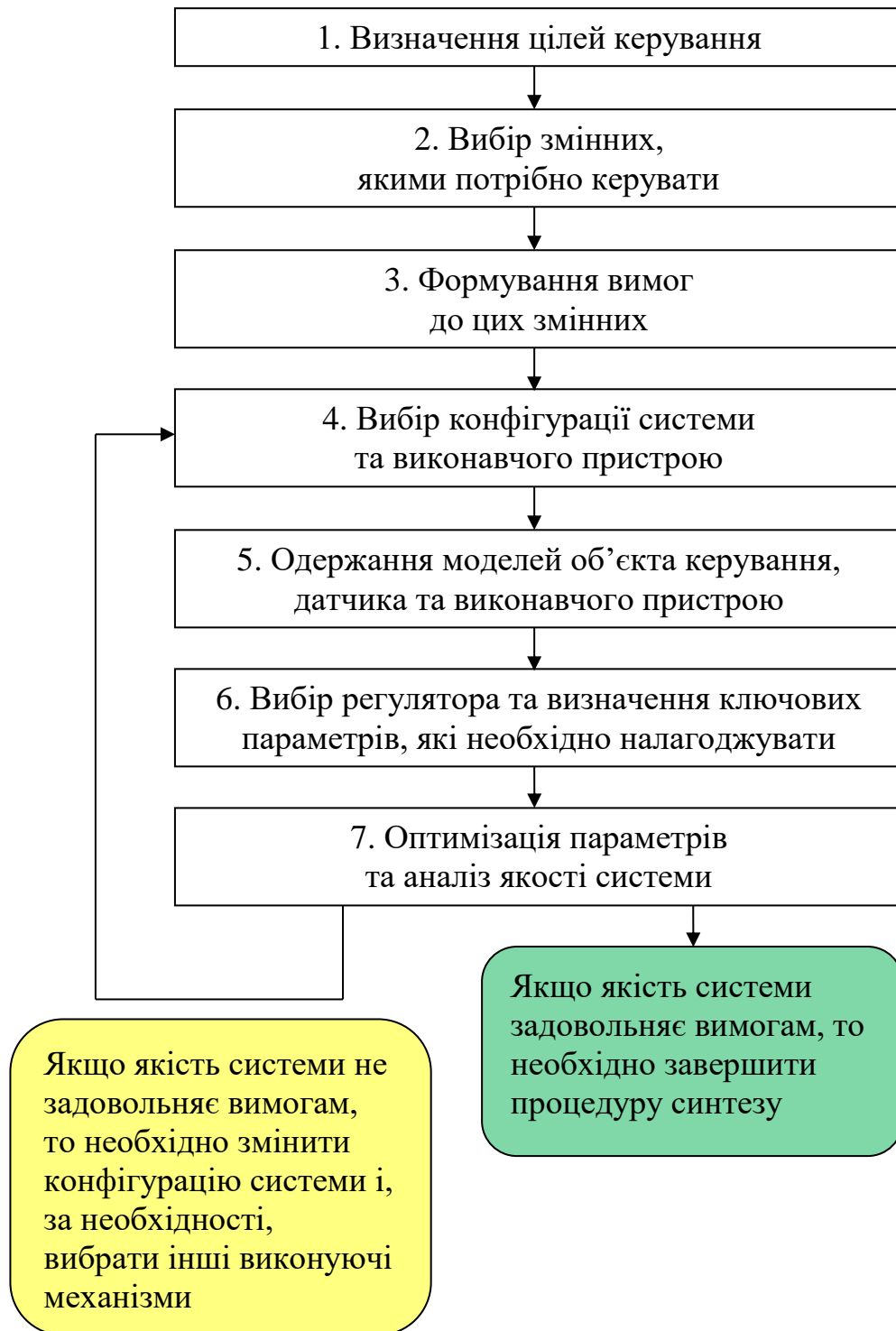
Головне завдання проектування – складання переліку вимог, які повинні задовольняти споживачів. У процесі технічного проектування приймає участь два типи мислення – аналіз і синтез, між якими є принципова різниця.

У процесі аналізу основна увага приділяється побудові моделей фізичних систем. Метою в цьому випадку є більш глибоке розуміння процесів, що виникають в системах та розробка шляхів удосконалення їх моделей.

Синтез, навпаки, – це діяльність в результаті якої створюються нові фізичні структури.

Процес проектування може виконуватись за декількома напрямкам, проте проєктант обирає найбільш оптимальний із них. Це детально продуманий процес, за допомогою якого проєктант створює інноваційний продукт, що задовольняє вимоги споживачів, не зважаючи на практичні обмеження. За своєю природою це ітераційний процес. Досвідчений інженер-проєктант спочатку спрощує систему з метою її аналізу і синтезу. При цьому виникає різниця між реальною системою і моделлю. Подібна різниця між реальною оптимальною системою і проєктним виробом існує завжди, тому що проєктанту інтуїтивно простіше поступово покращувати систему керування. Іншими словами, технічне проектування ніколи не виконується за оптимальною траєкторією, це ітераційний, нелінійний, творчий процес.

Основний метод, що використовується у більшості задач технічного проектування, – це метод аналізу та оптимізації параметрів. Він заснований на ідентифікації (1) ключових параметрів, формування конфігурації системи (2), та оцінці того, що дана конфігурація відповідає заданим параметрам проектування (3). Ці три етапи утворюють замкнений цикл. Як тільки буде встановлено ключеві параметри й синтезовано структуру системи, проєктувальник може приступити до оптимізації параметрів. На практиці число таких налагоджуваних параметрів необхідно зводити до мінімуму, що значно прискорює процес проектування. Синтез систем керування – це приклад технічного проектування. Схему процесу синтезу системи керування наведено на рис. 1.5.



### Рисунок 1.5. – Процес синтезу системи керування

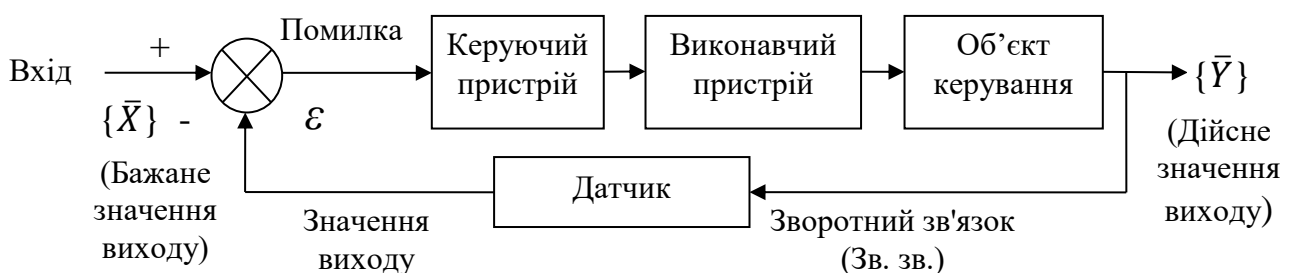
Перший крок процесу – визначення призначення системи.

Другий крок – визначення змінних, якими потрібно керувати.

На третьому кроці ми повинні визначити точність системи, з якою потрібно підтримувати вихідні показники керування об'єктом.

Останнє визначає вибір датчиків, за допомогою яких вимірюються змінні, значення яких потрібно підтримувати системою керування.

У процесі проектування систем автоматичного керування складними технологічними процесами виробництва продуктів харчування проєктант повинен спочатку створити конфігурацію системи, яка включає в собі датчик, об'єкт керування, виконавчий пристрій та регулятор. Приклад такої системи наведено на рис. 1.6. Система в нашому випадку функціонує за замкненим циклом. Якщо датчик є високоточним, то вимірюване значення виходу системи дорівнює його дійсному значенню. Різниця між бажаним і дійсним значеннями вихідної змінної, тобто помилка, надходить на керуючий пристрій (наприклад, підсилювач). З його виходу сигнал **надходить на виконавчий пристрій**, який впливає на об'єкт керування таким чином, щоб зменшити помилку. Система на рис. 1.6 – це система з від'ємним зв'язком, тобто сигнал вираховується (віднімається) із вхідного, а різниця подається на вхід підсилювача (E).



**Рисунок 1.6. – Система з від'ємним зворотним зв'язком (керуючий пристрій називають регулятором)**

У процесі синтезу системи необхідно звернути увагу на вибір виконавчого пристрою. Прийняття рішення у нашому випадку залежить від типу об'єкта керування, але в будь-якому випадку визначений пристрій повинен ефективно впливати на поведінку об'єкта керування.

Наприклад, ми хочемо спроектувати систему автоматизованого керування швидкістю електроприводу конвеєра тунельної печі для випікання хліба. Тоді в якості виконавчого пристрою ми можемо вибрати електродвигун постійного струму або асинхронний двигун з тиристорним перетворювачем частоти (АД-ТПЧ). При цьому датчик швидкості руху конвеєра повинен вимірювати цей параметр з високою точністю. У кінцевому розрахунку ми повинні одержати модель для кожного із цих елементів.

Наступний крок полягає у виборі регулятора, який часто представляє собою суматор. Він виконує операцію порівняння бажаного і дійсного значення вихідної змінної об'єкта, після якої наступний елемент системи, підсилювач сигналу помилки з регулятором, відпрацьовує сигнал помилки, змінюючи значення показника положення виконавчого механізму.

Заключний крок процедури синтезу системи полягає у виборі методу налагодження параметрів системи, які б забезпечували бажані показники якості системи. На цьому процес синтезу системи закінчується, а проєктант повинен оформити робочу документацію.

Вимоги до якості замкненої системи керування повинні торкатись її



основних характеристик, до яких відносимо: 1 – гарну компенсацію збурень; 2 – бажаний вид реакції на заданий вхідний вплив; 3 – адекватні вхідні сигнали виконавчого пристрою; 4 – малу чутливість до зміни параметрів; 5 – робастність.

У процесі вивчення подальших тем, представлених у цьому підручнику, здобувачам вищої освіти будуть надані знання, навички та вміння комп'ютерного моделювання, аналізу й синтезу систем керування виробництвом якісних продуктів харчування, а також високопродуктивних програмних продуктів аналізу й синтезу систем керування.

Високоточне комп'ютерне моделювання дуже важливе для перевірки результатів синтезу систем. У багатьох випадках сертифікація систем керування здійснюється шляхом натурального моделювання складних технологічних процесів виробництва смарт-продукції, вимагає від проєктантів значних витрат часу та коштів. У той же час використання комп'ютерного моделювання значно (на 30%) скорочує час на виконання процесу проєктування та сертифікацію системи, а також до 50-60% зменшуються фінансові витрати.

### ***Контрольні запитання***

- 1. Наведіть основні характеристики автоматизованого керування.*
- 2. Поясніть термін автоматизація.*
- 3. Назвіть приклади замкнених систем керування.*
- 4. Назвіть основні задачі керування.*
- 5. Наведіть визначення основних термінів: автоматизація виробництва, автоматичні й автоматизовані системи, структури систем, вхідні та вихідні змінні об'єкта керування, синтез систем.*
- 6. Наведіть приклади синтезу технічних систем керування.*
- 7. У чому полягає комп'ютерне моделювання?*

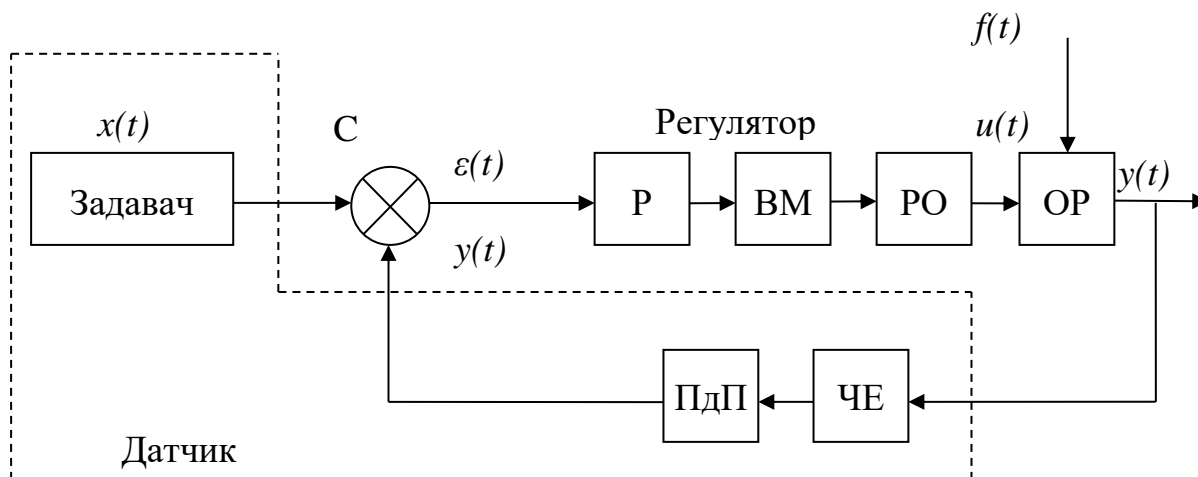
## Тема 2. Системи автоматичного регулювання

### 2.1. Загальна структура системи автоматичного регулювання

Теорія автоматичного регулювання (ТАР) є основною частиною теорії керування.

Система автоматичного регулювання (САР) складається із об'єкта регулювання, датчика і автоматичного регулятора.

На рис. 2.1. наведено блок-схему системи автоматичного регулювання.



**Рисунок 2.1. – Блок-схема системи автоматичного регулювання:**  
**С** – суматор; **Р** – регулятор; **ВМ** – виконавчий механізм; **РО** – регулюючий орган; **ОР** – об'єкт регулювання; **ЧЕ** – чутливий елемент; **ПдП** – підсилювач-перетворювач

На САР діють деякі зовнішні фактори, які прагнуть вивести її із рівноваги (сталого стану). Ці фактори будемо називати збуреннями  $f(t)$ . Збурення бувають: ступеневі, імпульсні, гармонічні, стохастичні, «білий шум».

Метою САР є підтримування постійної величини (параметру), що характеризує процес, або зміни її за заданим законом (алгоритмом), при якому величина, що регулюється, незначно відрізняється від заданого значення.

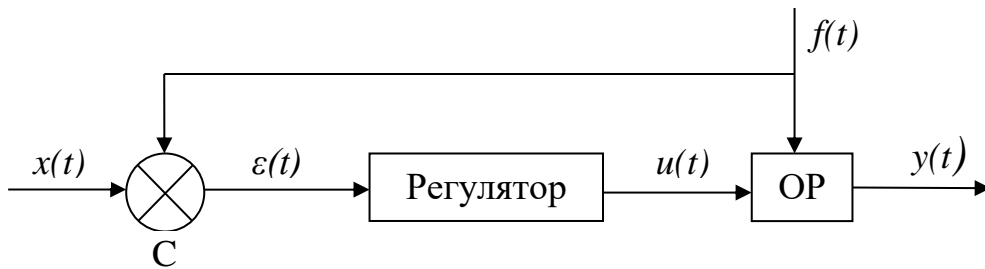
Існує три принципи побудови САР, які забезпечують реалізацію необхідного закону зміни регульованої величини:

- за розімкненого циклу (принцип Понселе, за збуренням);
- за замкненого циклу (принцип Ползунова-Уатта, за відхиленням);
- за комбінованого циклу (по замкнено-розімкненому принципу).

### 2.2. Сутність принципу Понселе

Регулювання за збуренням або за компенсацією полягає в тому, що із сукупності збурень, діючих у системі, виокремлюють одне головне, на яке реагує САР. При цьому компенсується вплив на регулюючий параметр  $y(t)$  лише основного збурювального впливу і регулюючого впливу  $u(t)$ , що

формується в САР відповідно до результатів вимірювання головного збурюючого фактору, діючого на об'єкт. Цей алгоритм керування наведено на рис. 2.2.



**Рисунок 2.2. – Блок-схема САР за збуренням,  
 $\varepsilon(t) = x(t) - y(t)$  – неузгодження**

Переваги цього принципу у тому, що вплив збурення  $f(t)$  на систему можна зменшити до того, як виникне відхилення регульованого параметра, внаслідок впливу регулятора на об'єкт. Регульований параметр  $y(t)$  на виході об'єкта не зв'язаний із входом регулятора. Регулюючий вплив  $u(t)$  не залежить ані від протікання (ходу) процесу в об'єкті, ані від регулюючого параметру, проте формується лише збуджувальним впливом і законом керування, що його реалізує регулятор.

### 2.3. Сутність принципу Ползунова-Уатта

Регулювання за відхиленням базується на тому, що будь-яке відхилення параметра, що регулюється,  $y(t)$  від його заданого значення  $x(t)$  обумовлює формування впливу, що регулюється,  $y(t)$  незалежно від кількості, виду і місця прикладання збурення. На рис. 2.3 наведено САР за відхиленням.



**Рисунок 2.3. – Блок-схема САР за відхиленням**

Параметр, що регулюється,  $y(t)$ , порівнюється із заданим значенням  $x(t)$ , визначається різниця (неузгодження)  $\varepsilon(t) = x(t) - y(t)$  і регулятор виробляє регулюючий вплив  $u(t)$ . Тобто, для формування регулюючого впливу необхідна наявність помилки, що є недоліком цього методу.

## 2.4. Комбінований (замкнуто-розімкнутий) принцип регулювання

Цей принцип за відхиленням і за збуренням сполучає переваги й недоліки описаних вище принципів. На рис. 2.4 наведено блок-схему комбінованої САР.

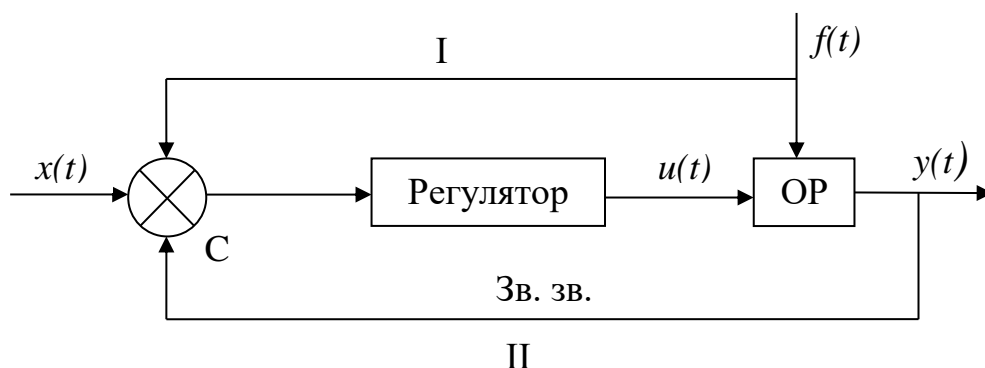


Рисунок 2.4. – Блок-схема комбінованої САР

У комбінованій САР вплив за навантаженням  $f(t)$  забезпечують в темпі з процесом формування регулюючого впливу  $u(t)$ , відповідно зміні навантаження (контур I) і за відхиленням (контур II), з метою зменшення неузгодження, що виникає в результаті помилки регулювання за навантаженням.

Таким чином, комбінований принцип регулювання має переваги: дія основного збурення на ОР компенсується спочатку контуром I (у головному розімкненому контурі збурення без впливу саме на його величину), а неузгодження від решти збурень компенсується потім регулятором по принципу регулювання за відхиленням, тобто за рахунок контуру II і зворотного зв'язку (Зв. зв.), у мірі дії цих збурень на ОР, у замкненому контурі вихідного параметру  $y(t)$ .

Відомий ще і такий принцип регулювання, як адаптація. На рис. 2.5 наведено його принципову блок-схему.

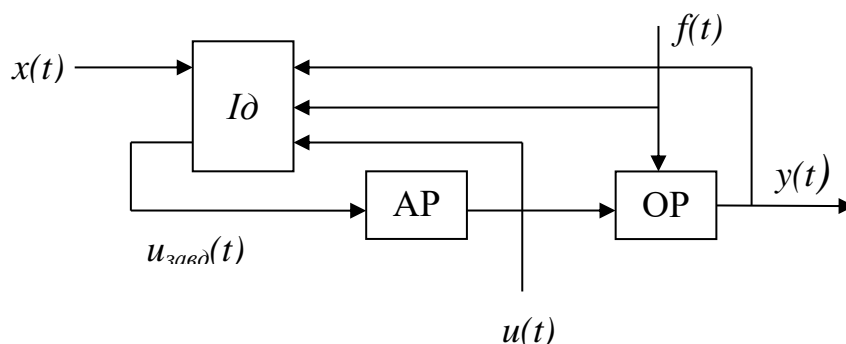


Рисунок 2.5. – Адаптивна система регулювання з ідентифікатором ( $I\delta$ )

Автоматичні системи регулювання, спроектовані за цим принципом, відносяться до замкнених супервізорних систем з самопристосуванням та самоналагодженням [2,3,9, 21]. Вони обов'язково містять ідентифікатор ( $I\delta$ ),

який враховує в реальному масштабі часу вихідне значення  $y(t)$  основного збурення  $f(t)$  та виробляє завдання  $u_{завд}(t)$  регулятора АР.

Системи, побудовані за принципом адаптації, є більш доцільними за функціонування ОР в умовах зміни робочих характеристик обладнання, технологічних, виробничих, бізнес-величин і здійснюються за допомогою комп'ютерних систем керування технологічними процесами в харчовій промисловості.

Якщо в автоматизованій системі регулювання (АСР) підтримується постійне значення технологічного параметра  $y(t) = const$ , то саме мінімум неузгодження є критерієм керування:  $\Delta y = y_{зад} - y(t)$ .

Сучасні комп'ютерні АСР здійснюють оптимальне керування технологічними апаратами, тому проєктанти обирають більш складні показники, наприклад, продуктивність або енергоефективність.

З цього погляду критерій керування – це технологічний параметр (неузгодження) або техніко-економічний показник (собівартість), що характеризує якість роботи технологічного ОР у складі АСР.

Під оптимізацією керування будемо розуміти пошук оптимального керування, що дасть змогу досягнути максимуму, мінімуму або сталого значення критерію керування за існуючих умов виробництва якісних та безпечних продуктів харчування [1, 2,3,13].

## 2.5. Дослідження систем автоматизованого регулювання

Технологічні процеси і системи комп'ютерного керування в харчовій промисловості вирізняються за апаратними рішеннями, але в них обов'язково присутні такі елементи:

*регулятор* (Р) – автоматичний пристрій, що реагує на відхилення параметра, що регулюється, від заданого значення і змінює приріст речовини або енергії до об'єкту, що регулюється, з метою підтримування сталого стану. Регулятор складається із вимірюючого і керувального пристроїв, виконуючого механізму, регулюючого органу та лінії зв'язку;

*датчик* – вимірюючий пристрій – вимірює за допомогою чутливого елемента (ЧЕ), перетворює і підсилює отриманий вплив, сформований у вигляді сигналу, для керування наступним елементом регулятора (ВМ);

*пристрій керування* – призначений для сприйняття впливу від пристрою вимірювання, і який порівнює його з впливом від задавальника в суматорі (С) та виробляє сигнал (неузгодження), пропорційний заданому значенню параметру, що регулюється. Пристрій керування підсилює одержану різницю (неузгодженість) і керує (підтримує) задані значення параметрів температури (процес стерилізації), охолодження (процес підготовки), енергоефективності (процес мінімізації витрат енергії) за допомогою виконавчих механізмів;

*виконавчий механізм* (ВМ) – призначений для переміщення регулюючого органу (РО) під впливом сигналу неузгодження, одержаного від керувального пристрою;

*регулюючий орган* – слугує для впливу на об'єкт регулювання (ОР)

шляхом збільшення або зменшення сигналу на об'єкт регулювання (наприклад, зменшення/збільшення витрат води в тістомісильний апарат, зменшення частоти напруги ТПЧ асинхронного двигуна тощо).

Для забезпечення необхідного впливу регулятора на РО у перехідному процесі, тобто з метою переходу від сталого попереднього стану процесу до нового, будемо використовувати *зворотні зв'язки* (Зв. зв.). У перехідному процесі регулятор не завжди може забезпечити необхідний характер зміни параметра, що регулюється, від заданого значення, що обумовлено наявністю перерегулювання, тобто великого значення відхилення параметру, що регулюється, від заданого значення, що недопустимо з точки зору оптимального процесу виробництва продукту харчування. Отже, керуючий пристрій водночас знаходиться під впливом вимірювального і задавального пристроїв, а також зворотного зв'язку. Вплив, що його одержує регулятор від об'єкта за рахунок вимірюючого пристрою, називається головним або зовнішнім зворотним зв'язком.

Крім цього, є внутрішні зворотні зв'язки, що дозволяють змінювати характеристику регулятора. Внутрішні зворотні зв'язки бувають позитивними та від'ємними.

Позитивний зворотний зв'язок діє на попередній елемент системи з тим же знаком, з яким на нього виконується основний вплив від вимірювального перетворювача (ВП) або вторинного приладу. Ефект позитивного зворотного зв'язку полягає у підсиленні діючого основного сигналу.

Від'ємний зворотний зв'язок діє зі знаком, протилежним знаку основного впливу. Такий зв'язок забезпечує значну стійкість системи, значно зменшує інерційність, збільшує ступінь затухання, змінює динамічну характеристику перехідного процесу.

У свою чергу, зворотні зв'язки бувають гнучкими та жорсткими.

*Жорсткий зворотний зв'язок* передає імпульс, пропорційний вихідній величині. Введення цього зв'язку призводить до формування статичної системи регулювання зі статичною помилкою, але при цьому має місце швидке затухання коливань параметрів системи в перехідний період.

*Гнучкий зворотний зв'язок* передає імпульс, пропорційний швидкості зміни вихідної величини. Цей зв'язок в стійкому режимі працює таким чином, як і система без зворотних зв'язків, що забезпечує системі астатичне регулювання, тобто у цьому випадку відсутня статична помилка. У перехідному періоді гнучкий зворотний зв'язок зменшує коливання, але повільніше, ніж при жорсткому зворотному зв'язку.

У регуляторах може використовуватись синтез гнучких і жорстких зворотних зв'язків, що дозволяє сформувати гнучкий ізодромний зв'язок. Ці зв'язки забезпечують стійке регулювання системи без статичної помилки.

Жорсткі зворотні зв'язки формують важільні, важільно-пневматичні, важільно-гідравлічні, локальні, електричні мостові, електронні та інші пристрої.

Гнучкий зворотний зв'язок може створюватись в сильфонно-пневматичній системі сильфонами та важелем зворотного зв'язку, що діє на дросельну заслінку; в електронній мостовій системі – резисторами, що

підігріваються нагрівачем.

Будь-яка САР складається із 2-х основних елементів: об'єкта регулювання регулятора.

*Об'єкт регулювання* (ОР) – апарат, машина або інша структура, де протікає певний технологічний процес.

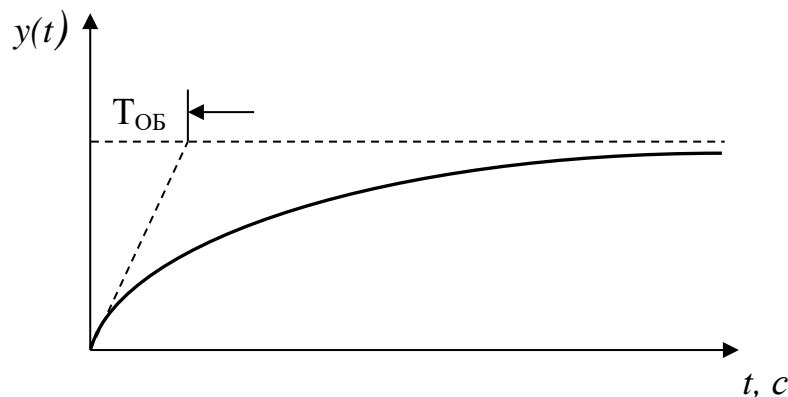
У залежності від структури ОР підрозділяються на *одновимірні* – мають по одній вхідній та одній вихідній змінній – наприклад, резервуар (збірник) води, та *багатовимірні* – мають число векторів вхідних і вихідних змінних більше за одиницю, наприклад, два послідовно з'єднаних резервуари води.

Основними властивостями об'єктів регулювання є:

- ємність об'єкта;
- самовирівнювання;
- час розгону об'єкта;
- запізнення.

Ємність об'єкта – це здатність об'єкта акумулювати речовину або енергію.

Самовирівнювання – властивість об'єкта регулювання після внесення збурення (наприклад, зміни рівноваги між припливом і витратами речовини) самостійно, без участі людини або регулятора, переходить у новий рівноваговий стан. Самовирівнювання сприяє більш швидкій стабілізації величини, що регулюється, і, відповідно, полегшує функціонування регулятора.



**Рисунок 2.6.– Міра інерційності (ємності) статичного об'єкту**

Математично самовирівнювання ОР пов'язане з виглядом його рівняння динаміки, а саме:

1. Об'єкт із позитивним самовирівнюванням, якщо його модель описана рівнянням виду:

$$T_{ОБ} \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_1 x(t) \quad (2.1)$$

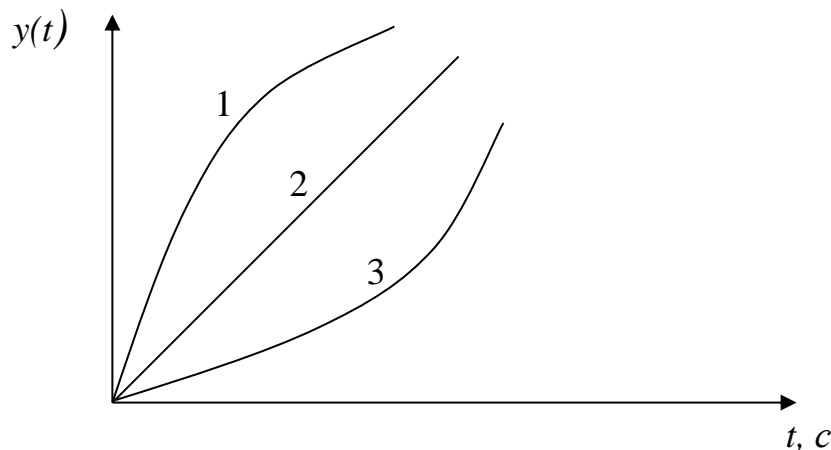
2. Об'єкт без самовирівнювання, якщо його модель описана рівнянням виду:

$$\frac{dy(t)}{dt} = K_2 x(t) \quad (2.2)$$

3. Об'єкт з негативним самовирівнюванням, якщо його модель описана рівнянням виду:

$$-T_{\text{об}} \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_3 x(t) \quad (2.3)$$

Перехідні характеристики таких ОР мають вигляд, наведений на рис. 2.7.



**Рисунок 2.7. – Перехідні процеси в об'єктах:**

**1 – із позитивним самовирівнюванням; 2 – без самовирівнювання;  
3 – із негативним самовирівнюванням**

Отже, щоб з'ясувати, стійкий об'єкт чи нестійкий, достатньо знати, як впливає в САР відхилення регульованого параметра на надходження і витрату речовини або енергії в об'єкті.

Розглянемо два прості приклади.

Нехай в стійкому режимі, за визначеним значенням приходу палива, тиск пару в барабані котла  $P_0$ . При збільшенні кількості палива значення параметру  $P_0$  також збільшується і дорівнює  $P_1$ , тобто знову досягається стійкий режим, але вже на новому рівні. Це нове положення рівноваги після збурення у визначених межах може бути досягнуто без регулятора, як наведено на рис. 2.8.

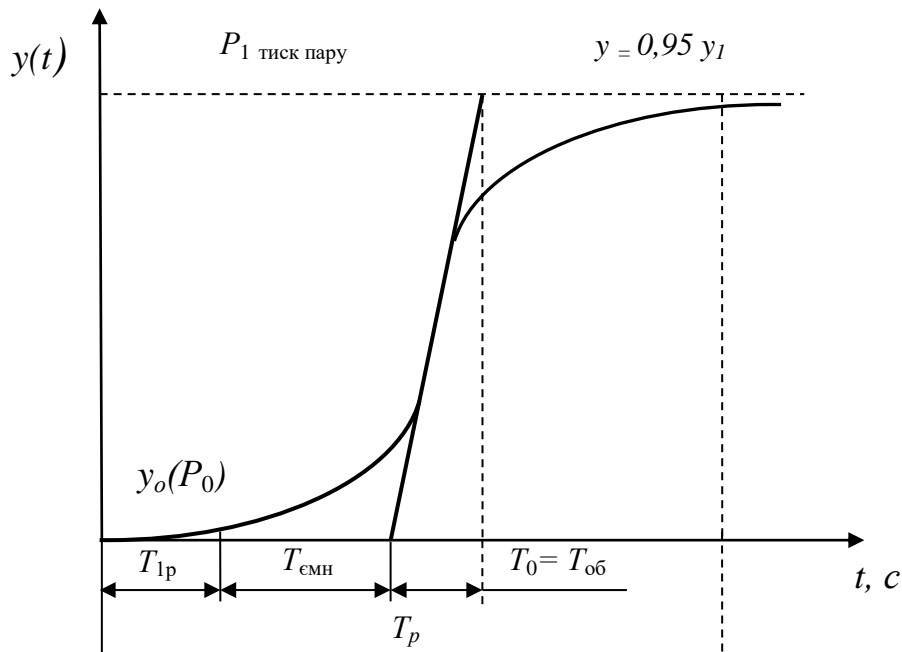
Цей приклад віднесено до об'єктів регулювання з самовирівнюванням. Мірою ємності ОР із самовирівнюванням є постійна часу кривої розгону  $T_0 = T_{\text{об}}$ . Це час, впродовж якого регулюємий параметр змінюється з постійною швидкістю від нуля до номінального значення (див. рис. 2.8).

До об'єкта без самовирівнювання можна віднести рівень води в барабані котла. Цей приклад наведено на рис. 2.9. При різкому збільшенні витрат води в барабан котла її рівень ( $H$ ) в барабані збільшується.

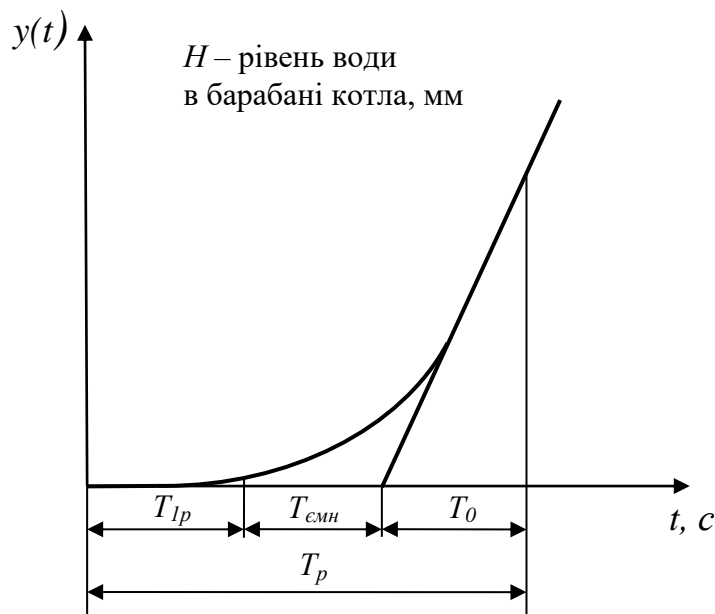
Витрата пару із котла залишається тим же значенням, проте надходження води продовжується, тому рівень  $H$  зростає.



У цьому випадку (для об'єкта без самовирівнювання) значення часу розгону  $T_p$  і постійної часу об'єкта  $T_{об}$  можуть співпадати.



**Рисунок 2.8. – Крива розгону статичного об'єкту.  
Об'єкт регулювання – барабан**



**Рисунок 2.9. – Криві розгону астатичного об'єкту.  
Об'єкт регулювання – барабан котла**

Величина, зворотна часу розгону, завжди пропорційна швидкості розгону об'єкта:

$$\varepsilon = \frac{1}{T_p(1/c)} \quad (2.4)$$

Кількісно самовирівнювання визначається коефіцієнтом, що показує, який приріст вхідної величини спричинює зміну вихідної на одиницю її вимірювання, тобто він показує, в якій ступені відхилення параметра впливає на небаланс:

$$\rho = \frac{Y}{X} \quad (2.5)$$

де  $X$  – кількісний показник збурення;

$Y$  – кількісний показник величини, що регулюється.

Для об'єктів із самовирівнюванням частіше використовують величину, яка зворотна коефіцієнту самовирівнювання. Її будемо називати коефіцієнтом підсилення об'єкта  $K_p$ , причому:

$$K_p = \frac{1}{\rho} \quad (2.6)$$

У системах автоматичного регулювання після одержання збуреного впливу (стрибком змінюються витрати речовини) регульований параметр змінюється не миттєво, а через деякий час. Цей час називається запізнюванням в об'єктах.

Запізнювання в об'єктах проявляється подібно до інерційності в тому, що вихідна величина починає змінюватися не відразу після прикладання збурення (керування), а через деякий проміжок часу, що і визначає запізнювання [3,6,9]. Воно спричинюється тим, що речовина або енергія розповсюджується в об'єкті з кінцевою швидкістю, як і інформація про це.

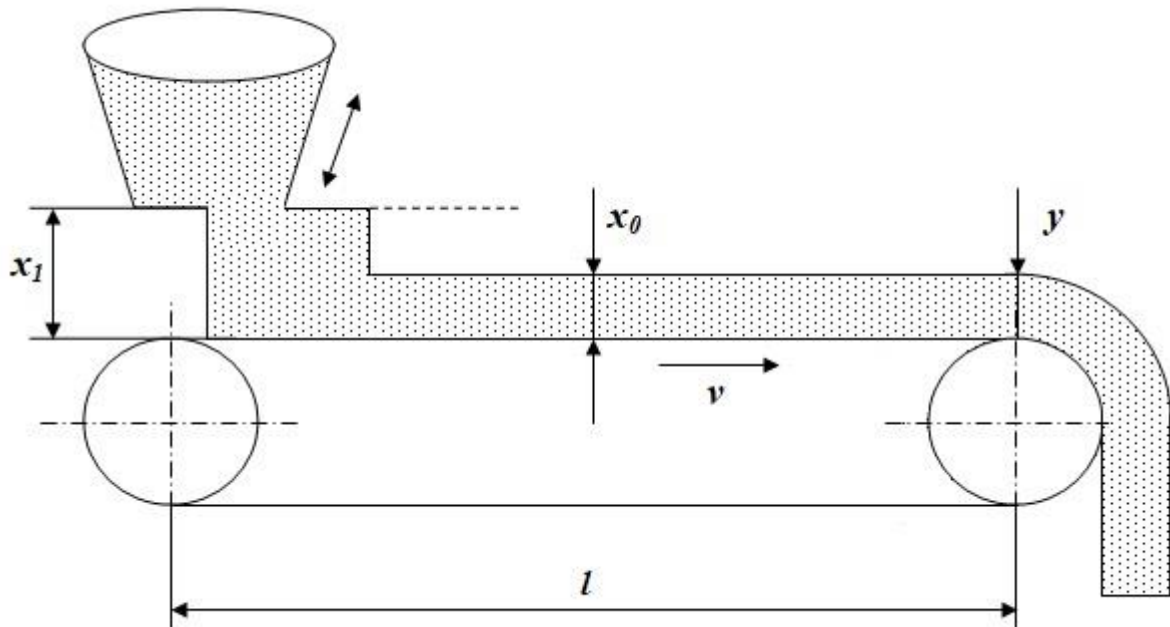
Ємнісне запізнення залежить від ємності об'єкта. Додамо, що ємність об'єкта – його здатність акумулювати (витратити або накопичувати) речовину чи енергію в процесі керування (регулювання) ним.

Для гідравлічних об'єктів ємність, як і місткість, оцінюється об'ємом накопиченої рідини, теплових – кількістю накопиченої теплоти, рухомих – кількістю руху (моментом інерції). Ємність показує кількість речовини або енергії, що накопичується в об'єктах за визначеного (або певного) значення вихідної величини (рис. 2.9).

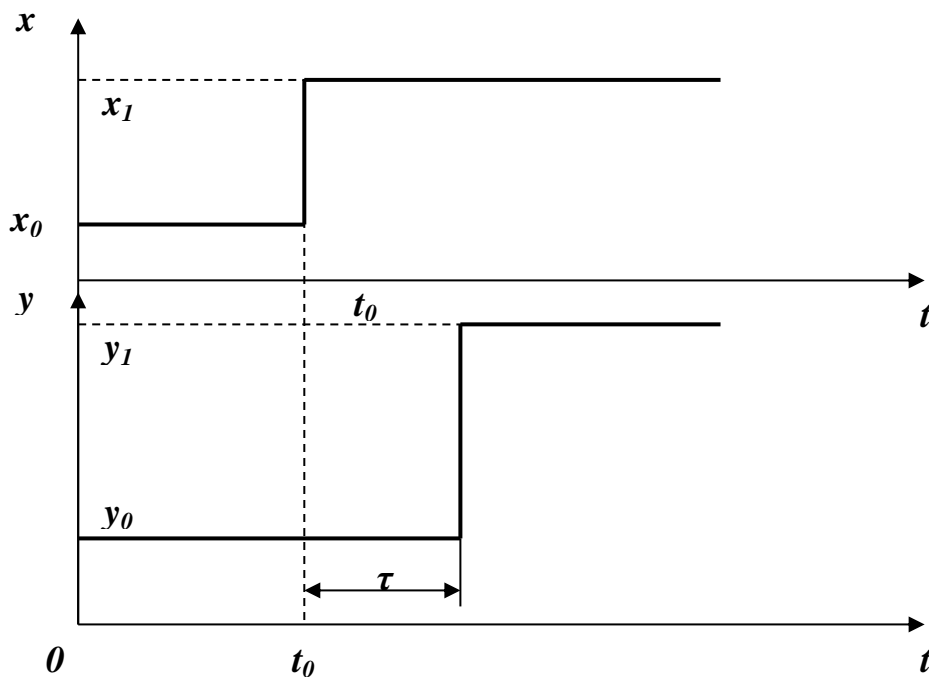
За видом походження запізнювання може називатись транспортним  $\tau_{тр}$ , коли час  $\tau_{тр}$  від моменту вчинення збурення до початку зміни керованого параметра. Транспортне запізнення пов'язане зі швидкістю  $v$  розповсюдження дії в середовищі об'єкта і може спостерігатися навіть в астатичних або в без інерційних об'єктах.

При цьому значення і форма вихідної величини залишаються такими самими, як і у вхідної, а перехідні процеси, що відбуваються в об'єкті (рис. 2.10а) мають вигляд, зображений на рис. 2.10б.

Перехідне запізнення  $\tau_n$  пов'язане з інерційністю об'єкта та формою (закономірністю) зміни вихідної величини, що показано на рис. 2.8.



**Рисунок 2.10.а – Схема об'єкта з чистим (транспортним) запізненням**



**Рисунок 2.10,б – Динамічна характеристика об'єкта регулювання з чистим (транспортним) запізненням**

Повне запізнювання визначається за формулою:

$$\tau_z = \tau_{тр} + \tau_{п}, \quad (2.6)$$

$$\tau_{тр} = \frac{l}{v}.$$

Найбільшим запізнюванням характеризуються об'єкти, в яких регулюється температура, а найменшими – об'єкти, в яких підтримується навантаження.

### ***Контрольні запитання:***

- 1. Дайте визначення загальної структури системи автоматичного регулювання.*
- 2. Поясніть сутність принципу Ползунова-Уатта*
- 3. В чому особливість аналізу комбінованих (замкнуто-розімкнутих) принципів регулювання.*
- 4. Методи використання зворотних зв'язків*
- 5. Комбінований (замкнуто-розімкнутий) принцип регулювання.*
- 6. Назвіть основні ознаки об'єкта керування.*
- 7. В чому особливість аналізу математичного самовирівнювання ОР.*
- 8. Вкажіть вигляд рівняння динаміки об'єктів регулювання.*

### Тема 3. Математичні моделі систем автоматики

Для вивчення властивостей складної фізичної системи та створення системи керування нею необхідно одержати її математичну модель. Для цього необхідно встановити всі взаємозв'язки між змінними, що характеризують поведінку системи. Оскільки всі реальні системи за своєю природою є динамічними, то для їх опису будемо використовувати диференціальні рівняння. Крім цього ці рівняння можуть бути лінеаризованими, і тоді для них можна буде використовувати перетворення Лапласа [3,4, 5,6,7,9].

На основі вивчення фізичних законів, що описують поведінку еквівалентної лінійної системи, ми можемо спочатку одержати систему диференціальних рівнянь. Після цього, використовуючи математичний апарат такий, як перетворення Лапласа, ми можемо отримати рішення, що будуть характеризувати поведінку даної системи. Отже, алгоритм дослідження динаміки системи буде складатися із таких етапів:

1. Визначити систему та її компоненти.
2. Скласти математичну модель та визначити деякі допущення.
3. Записати диференціальні рівняння, які описують поведінку моделі.
4. Обчислити рівняння відносно бажаних вихідних змінних.
5. Проаналізувати рішення і допущення.
6. Провести детальний аналіз або синтез системи.

#### 3.1. Диференціальні рівняння фізичних систем

Диференціальні рівняння, які описують динаміку фізичної системи, одержують на основі фундаментальних фізичних законів. Цей метод у рівному ступені можна застосовувати до механічних, електричних, гідравлічних і термодинамічних систем. Для опису різних процесів будемо використовувати наступні позначення:

прохідні змінні:  $F$  – сила,  $T$  – момент,  $I$  – струм,  $Q$  – об'ємні витрати речовин,  $q$  – тепловий потік;

відносні змінні:  $v$  – поступальна швидкість;  $w$  – кутова швидкість;  $U$  – напруга,  $P$  – тиск,  $T$  – температура;

індуктивні накопичувачі:  $L$  – індуктивність,  $1/k$  – зворотний коефіцієнт жорсткості,  $i$  – інертність речовини;


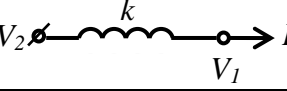
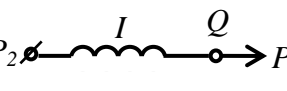
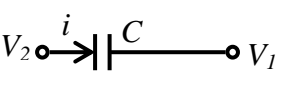

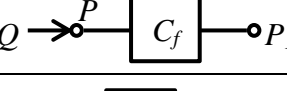
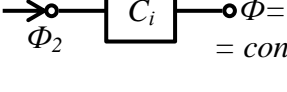
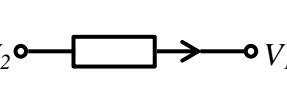
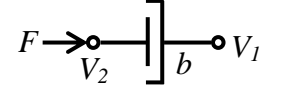
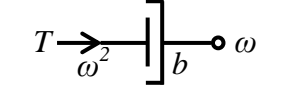
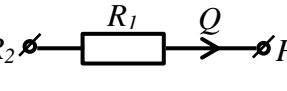
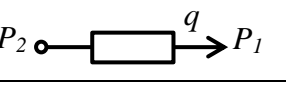
ємнісні накопичувачі:  $C$  – ємність,  $M$  – маса,  $j$  – момент інерції,  $C_f$  – речовинна ємність,  $C_t$  – теплова ємність.

розсіювачі енергії:  $R$  – опір,  $b$  – в'язке тертя,  $R_j$  – гідравлічний опір,  $R_t$  – тепловий опір.

Диференціальні рівняння лінійних динамічних елементів наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1.

## Диференціальні рівняння ідеальних елементів

Тип елемента	Фізичний елемент	Диференціальне рівняння	Енергія $E$ або потужність $P$	Позначення
Індуктивні накопичувачі	Електрична індуктивність	$V_{21} = L \frac{di}{dt}$	$E = \frac{1}{2} Li^2$	
	Пружина стиснена	$V_{21} = \frac{1}{k} \frac{dF}{dt}$	$E = \frac{1}{2} \frac{F^2}{k}$	
	Інерція речовини	$P_{21} = I \frac{dQ}{dt}$	$E = \frac{1}{2} IQ^2$	
	Електрична ємність	$i = C \frac{dV_{21}}{dt}$	$E = \frac{1}{2} CV_{21}^2$	
	Маса з лінійним переміщенням	$F = M \frac{dV_2}{dt}$	$E = \frac{1}{2} MV_2^2$	
Ємнісні накопичувачі	Гідравлічна ємність	$Q = C_f \frac{dP_{21}}{dt}$	$E = \frac{1}{2} C_f P_{21}^2$	
	Теплова ємність	$q = C_i \frac{dP_2}{dt}$	$E = C_i P_2$	
	Електричний опір	$I = \frac{1}{R} V_{21}$	$P = \frac{1}{R} V_{21}^2$	
	Амортизатор лінійної дії	$F = bV_{21}$	$P = bV_{21}^2$	
Розсіювачі потужності	Обертвий амортизатор	$T = b\omega_{21}$	$P = b\omega_{21}^2$	
	Гідравлічний опір	$Q = \frac{1}{R_f} P_{21}$	$P = \frac{1}{R_f} P^2$	
	Тепловий опір	$q = \frac{1}{R_1} P_{21}$	$P = \frac{1}{R_1} P_{21}$	

Розглянемо два простих приклади. На рис 3.1 наведено схему пружинної маси з демпфуванням (амортизатор).

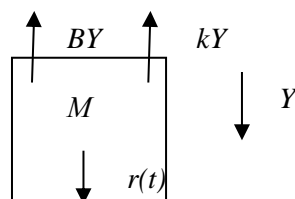


Рисунок 3.1. – Система пружинна маса з демпфуванням

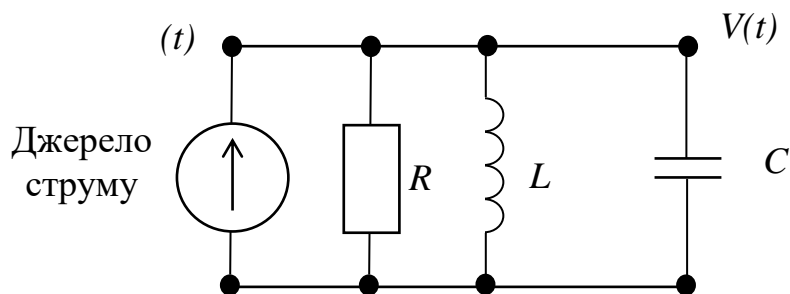
У цьому прикладі ми будемо вважати, що тертя вантажу об стінки є в'язким, тобто сила тертя лінійно залежить від швидкості руху вантажу у відповідності з другим законом Ньютона, сумуючи всі сили, що діють на масу  $M$  запишемо:

$$M \frac{d^2 Y(t)}{dt^2} + B \frac{dY(t)}{dt} + kY(t) = r(t), \quad (3.1)$$

де  $k$  – коефіцієнт пружності системи;  
 $B$  – коефіцієнт тертя.

Рівняння (3.1) є диференціальним рівнянням другого порядку зі сталими коефіцієнтами.

Таким же чином ми можемо описати за допомогою закону Кірхгофа RLC – мережу, наведену на рис 3.2.



**Рисунок 3.2. – RLC-мережа**

У результаті ми одержимо таке інтегрально-диференціальне рівняння вигляду:

$$\frac{V(t)}{R} + C \frac{dV(t)}{dt} + \frac{1}{2} \int_0^t V(t) dt = R(t). \quad (3.2)$$

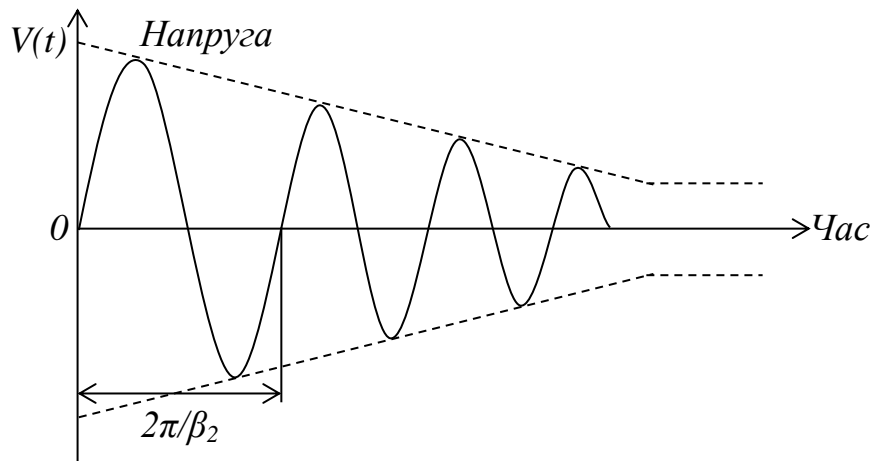
Рішення диференціального рівняння, яке описує динамічний процес, може бути отримане класичним методом – шляхом інтегрування з використанням невизначених коефіцієнтів. Наприклад, якщо важіль змістити в початкове положення  $Y(t) = Y(j)$ , а потім опустити, то рух такої недодемпфованої системи будемо описувати виразом:

$$Y(t) = K_1 e^{-\alpha_j t} \sin(\beta_j t + \theta_1). \quad (3.3)$$

Аналогічне рішення має місце для напруги  $V(t)$  RLC, якщо вона знаходиться під впливом постійного струму  $r(t) = I$ :

$$V(t) = K_2 e^{-\alpha_j t} \cos(\beta_2 t + \theta_2). \quad (3.4)$$

Типовий характер зміни напруги в недодемпфованій RLC-мережі наведено на рис 3.3.



**Рисунок 3.3. – Приклад зміни напруги в RLC-мережі**

Для того щоб показати приблизну подібність таких прикладів між диференціальними рівняннями механічних і електричних систем перепишемо рівняння (3.1) відносно швидкості:

$$v(t) = \frac{dY(t)}{dt}. \quad (3.5)$$

Одержимо:

$$M \frac{dv(t)}{dt} + bv(t) + K \int_0^t v(t) dt = r(t). \quad (3.6)$$

І тут ми можемо відмітити (3.6) еквівалентність (3.6) і (3.2), лише в одному із них змінна  $v(t)$  означає швидкість, а в іншому – напругу.

Тому дані змінні будемо називати змінними-аналогами, а відповідні системи – подібними системами.

Очевидно, що закон зміни швидкості буде також мати вигляд рівняння (3.4), якому відповідає крива на рис. 3.3. Поняття подібності систем є корисним і ефективним методом при моделюванні. Аналогію між напругою і швидкістю, часто називають аналогією сила-струм, оскільки вона характеризує зв'язок між подібними прохідними і відносними змінними електричних і механічних систем. Але часто використовується й інша аналогія, яку називають сила-напруга, при якій розглядаються подібність швидкості та струму. Подібні системи є в харчовій промисловості, коли мова йде про математичний опис електричних, механічних, теплових і гідравлічних систем. Наявність таких систем дозволяє проектуванцю розповсюдити рішення, одержані для однієї системи, на всі подібні системи, які ми описуємо аналогічними диференціальними рівняннями. Отже, результати, отримані, наприклад, при аналізі й синтезі електричних систем нагрівання носія та теплових систем стерилізації консервів, можуть бути використані при побудові математичних моделей гідродинамічних процесів стерилізації продуктів харчування.



### 3.2. Лінеаризація фізичних систем

Більшість фізичних систем є лінійними лише в незначному діапазоні зміни перемінних. Але при необмеженому зростанні цих змінних усі системи в кінцевому результаті є нелінійними. Дамо деякі визначення.

Системи будемо називати лінійними, коли вони досить точно можуть описуватися лінійними залежностями, тобто статичні характеристики «Вихід-вхід» у цьому випадку становлять собою прямі лінії.

У випадку із системою, наведеною на рис 3.2, якщо проаналізувати діючі на неї збурення і реакцію на ці збурення, можна визначити її як лінійну.

У цьому випадку збуренням є вхідний струм  $r(t)$ , а реакцією – напруга  $v(t)$ . У загальному випадку необхідною умовою лінійності системи є відповідний зв'язок між збуренням  $X(t)$  і реакцією  $Y(t)$ . Якщо до системи, яка знаходиться в стані спокою, прикласти збурення  $X_1(t)$ , то на виході з'явиться реакція  $Y_1(t)$ . Якщо при тих же умовах змусити систему збурюватись  $X_2(t)$ , то вона дає відповідну реакцію  $Y_2(t)$ .

Тоді відповідною умовою лінійності є те, щоб при збуренні  $X_1(t) + X_2(t)$  система створювала відповідну реакцію:

$$Y_1(t) + Y_2(t). \quad (3.7)$$

Це положення будемо називати принципом суперпозиції. Крім того, в лінійній системі повинен виконуватись фактор масштабування. Знову будемо вважати, що на вхід системи подається  $X$ , а вихід – змінна  $Y$ . Тоді необхідно, щоб при помноженні вхідної величини на константу  $\beta$  реакція (вихідна змінна) системи змінилась у таке число разів, тобто стала рівною  $\beta Y$ . Цю властивість називають гомогенністю. Отже, лінійна система задовольняє властивостям суперпозиції та гомогенності.

Якщо система характеризується залежністю  $Y = x^2$ , то вона не є лінійною, для неї не виконується принцип суперпозиції. Система з рівнянням  $Y = mx + b$  також не є лінійною, тому що вона не має властивостей гомогенності [3,9,12, 14,15,17].

У той же час таку систему будемо вважати лінійною в околі робочої точки  $x_0 y_0$  відносно малих прирощень  $\Delta x$  і  $\Delta y$ .

Якщо  $x = x_0 + \Delta x$  і  $y = y_0 + \Delta y$ , то одержимо:

$$y = mx + b$$

або

$$y_0 + \Delta y = mx_0 + m\Delta x + b, \quad (3.8)$$

а, отже, відповідно  $\Delta y = m\Delta x$ , що задовольняє необхідним умовам.

У багатьох випадках механічні та електричні елементи в достатньо широкому діапазоні зміни змінних параметрів можна вважати лінійними. Цього не можна сказати про теплові та гідравлічні елементи, які за принципом своєї

дії найчастіше є нелінійними. Але нелінійні елементи частіше вдається лінеаризувати за умови малих відхилень сигналів від їх стандартних відхилень. Такий вихід зазвичай використовують для одержання лінійних моделей транзисторів та електронних схем. Розглянемо загальний випадок, коли деякий елемент характеризується збуренням (прохідна змінна)  $x(t)$  та реакцією на нього (відносна змінна)  $y(t)$ . Зв'язок між змінними будемо визначати рівнянням:

$$y(t) = g[x(t)], \quad (3.9)$$

де  $g[x(t)]$  показує, що  $y(t)$  є функцією  $x(t)$ .

Позначимо координату робочої точки через  $x_0$ . Тоді безперервну функцію в колі робочої точки можна розкласти в ряд Тейлора:

$$y = g(x) = g(x_0) + \left. \frac{dg}{dx} \right|_{x=x_0} \frac{x-x_0}{1!} + \left. \frac{d^2g}{dx^2} \right|_{x=x_0} \frac{(x-x_0)^2}{2!} + \dots \quad (3.10)$$

Значення похідної  $\left. \frac{dg}{dx} \right|_{x=x_0}$  характеризує нахил дотичної до кривої функції  $y = g(x)$  в робочій точці  $x_0$ .

Ця дотична може слугувати гарною апроксимацією вхідної кривої у випадку малих значень  $(x - x_0)$ , тобто відхилення від робочої точки.

У цьому випадку запишемо:

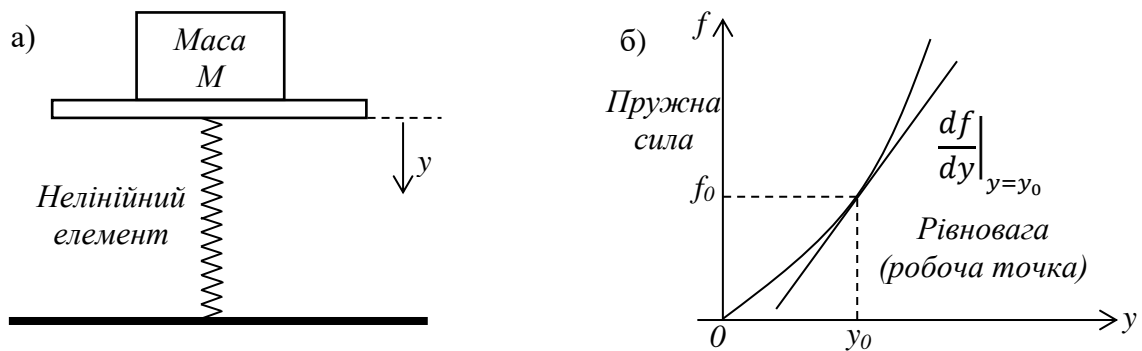
$$y = g(x_0) + \left. \frac{dg}{dx} \right|_{x=x_0} (x - x_0) = y_0 + m(x - x_0), \quad (3.11)$$

де  $m$  є тангенс кута нахилу дотичної до кривої в робочій точці.

Після цього запишемо рівняння у вигляді  $(y - y_0) = m(x - x_0)$  або  $\Delta y = m \Delta x$ .

З метою розширення понять і знань про лінеаризацію фізичних систем розглянемо приклад, коли вантаж масою  $M$  розташований на нелінійній пружині. Цей приклад з нелінійним елементом наведено на рис 3.4.

Робоча точка має місце в положенні рівноваги, коли пружна сила пружини дорівнює масі вантажу  $Mg$  і де  $g$  – прискорення сили тяжіння. Таким чином,  $f_0 = Mg$ , як показано на рис 3.4(б). Якщо нелінійний елемент характеризується залежністю  $f = y^2$ , то в положенні рівноваги  $y_0 = \sqrt{Mg}$ .



**Рисунок 3.4.**– а) маса  $M$  розташована на нелінійному елементі;  
 б) залежність сил від  $y$

Для малих відхилень лінійна модель буде описана рівнянням виду:

$$\Delta f = M \Delta y,$$

$$M = \left. \frac{df}{dy} \right|_{y_0}. \quad (3.13)$$

Отже,  $M = 2y$ .

Дану лінійну апроксимацію будемо вважати точною, оскільки допущення про малість прирощення змінних повністю може бути використаня до механічної системи.

Якщо змінна  $y$  залежить від декількох збурень  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , то функціональна залежність має вид

$$y = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.14)$$

До нелінійних функцій декількох змінних також можливо віднести розкладання в ряд Тейлора в околі робочої точки з координатами  $(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0})$ . Тоді лінійну апроксимацію можна представити у вигляді:

$$y = g(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0}) + \left. \frac{dq}{dx_1} \right|_{x=x_0} (x_1 - x_{10}) + \left. \frac{dq}{dx_2} \right|_{x=x_0} (x_2 - x_{20}) + q + \left. \frac{dq}{dx_n} \right|_{x=x_0} (x_n - x_{n0}) \quad (3.15)$$

де  $x_0$  – робоча точка.

Крім цього зауважимо, що функцію нелінійності можна замінювати прямою в околі робочої точки, але вона в цій точці повинна бути безперервно диференційованою. Якщо положення або значення робочої точки змінюється за зміни режиму роботи об'єкта, то лінеаризацію слід повторити з новими координатами.

### 3.3. Перетворення Лапласа

Можливість лінеаризації фізичних систем покажемо за допомогою апарату перетворень Лапласа. Метод перетворень Лапласа дозволяє замінити достатньо складні рішення диференціальних рівнянь відносно простим рішенням алгебраїчних рівнянь [3,9,12,21].

Визначення реакції системи вхідний вплив виконується в такому порядку:

- 1) одержання диференціальних рівнянь;
- 2) перетворення по Лапласу цих диференціальних рівнянь;
- 3) Рішення одержаних алгебраїчних рівнянь відносно змінної, яка представляє інтерес.

Для того щоб функція  $f(t)$  мала перетворення Лапласа, достатньо щоб виконувалась умова:

$$\int_0^{\infty} |f(t)| e^{-\sigma_1 t} dt < \infty, \quad (3.16)$$

Тобто даний інтеграл повинен сходиться для деякого дійсного позитивного значення  $\sigma_1$ . Якщо  $|f(t)| < Me^{\alpha t}$  для всіх позитивних  $t$ , то інтеграл сходиться при  $\sigma_1 > \alpha$ . Таким чином, область збірності визначається нерівністю  $\infty > \sigma_1 > \alpha$ , де  $\sigma_1$  відома як абсциса абсолютної збіжності. Усі фізичні реалізуємі сигнали мають перетворення Лапласа.

Перетворення Лапласа функції часу  $f(t)$  визначається виразом:

$$F(p) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt = L\{f(t)\}, \quad (3.17)$$

Зворотне перетворення Лапласа має вигляд:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\omega}^{\sigma+j\omega} F(x) e^{+pt} dp, \quad (3.18)$$

В процесі рішення практичних завдань використовується таблиці перетворень Лапласа, які одержати на основі виразів (3.17) і (3.18). У табл. 3.2 наведені основні прямі та зворотні перетворення Лапласа.

Зміну  $p$  в перетворенні Лапласа можна розглядати як оператор диференціювання, тобто:

$$p = \frac{d}{dt}. \quad (3.19)$$

Аналогічно можливо ввести оператор інтегрування:

$$\frac{1}{p} = \int_0^t dt. \quad (3.20)$$

Таблиця 3.2.

## Деякі важливості перетворення Лапласа

$f(t)$	$F(p)$
Ступенева функція, $u(t)$	$\frac{1}{p}$
$e^{-at}$	$\frac{1}{p + a}$
$\sin(\omega t)$	$\frac{\omega}{p^2 + \omega^2}$
$\cos(\omega t)$	$\frac{p}{p^2 + \omega^2}$
$t^n$	$\frac{n!}{p^{n+1}}$
$f^{(k)}(t) = \frac{d^k f(t)}{dt^k}$	$p^k(F(p)) - p^{k-1}f(0^-) - p^{k-2}f'(0^-) - \dots - f^{(k-1)}(0^-)$
$\int_{-\infty}^t f(t) dt$	$\frac{F(p)}{p} + \frac{1}{p} \int_{-\infty}^0 f(t) dt$
Імпульсна функція, $\delta(t)$	1
$e^{-at} \sin(\omega t)$	$\frac{\omega}{(p^2 + a^2) + \omega^2}$
$e^{-at} \cos(\omega t)$	$\frac{(p + a)}{(p^2 + a^2) + \omega^2}$
$\frac{1}{\omega} [(\alpha - a)^2 + \omega^2]^{\frac{1}{2}} e^{-at} \sin(\omega t + \varphi),$ $\varphi = \arctg \frac{\omega}{\alpha - a}$	$\frac{(p + a)}{(p^2 + a)^2 + \omega^2}$
$\frac{\omega_n}{\sqrt{1 - \xi^2}} e^{-\xi \omega_n t} \sin(\omega_n \sqrt{1 - \xi^2} t),$ $\varepsilon < 1$	$\frac{\omega_n^2}{p^2 + 2\varepsilon \omega_n p + \omega_n^2}$
$1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} e^{-\xi \omega_n t} \sin(\omega_n \sqrt{1 - \xi^2} t + \varphi),$ $\varphi = \arccos \xi, \quad \xi < 1$	$\frac{\omega_n}{p(p^2 + 2\varepsilon \omega p + \omega_n^2)}$
$\frac{1}{a^2 + \omega^2} + \frac{1}{\omega \sqrt{a^2 + \omega^2}} e^{-at} \sin(\omega t - \varphi),$ $\varphi = \arctg \frac{-\omega}{a}$	$\frac{1}{p[(p + a)^2 + \omega^2]}$
$\frac{\alpha}{a^2 + \omega^2} + \frac{1}{\omega} \left[ \frac{(\alpha - a)^2 + \omega^2}{a^2 + \omega^2} \right]^{\frac{1}{2}} e^{-at} \sin(\omega t + \varphi),$ $\varphi = \arctg \frac{\omega}{\alpha - a} - \arctg \frac{-\omega}{a}$	$\frac{p + \alpha}{p[(p + a)^2 + \omega^2]}$

Зворотнє перетворення Лапласа зазвичай знаходять шляхом розкладання  $F(p)$  на прості дроби за допомогою правила Хевісайда. Цей метод є корисним при аналізі та синтезі систем керування, оскільки він дозволяє легко виявити вплив кожного кореня характеристичного рівняння системи.

Звернемося до рівняння (3.1). Нам потрібно одержати його рішення, тобто знайти вираз  $y(t)$ .

$$M \left[ p^2 Y(p) - p y(0) - \frac{dy(t)}{dt} \right] + B [p Y(p) - y(0)] + K Y(p) = K(p), \quad (3.21)$$

Якщо  $r(t) = 0$ ,  $y(0) = y_0$ , то  $\frac{dy}{dt} \Big|_{t=0}$ , то ми одержимо:

$$M p^2 Y(p) - M p y_0 + B p Y(p) - B y_0 + K Y(p) = 0, \quad (3.22)$$

Звідси визначаємо  $Y(p)$ :

$$Y(p) = \frac{(M p + B) Y_0}{M p^2 + B p + 1} = \frac{P(p)}{q(p)}. \quad (3.23)$$

Якщо поліном  $q(p)$ , який стоїть в знаменнику, прирівняти до нуля, то ми одержимо характеристичне рівняння. Його назвали так, тому що корені визначають характер руху системи. Корені характеристичного рівняння називають також полюсами системи. Корені полінома  $P(p)$ , розташовані в чисельнику, називають нулями системи. Наприклад, вираз (3.23) має нуль  $p = -B/M$ . У полюсах функції  $Y(p)$  перетворюється в безкінечність, а в нулях вона стає рівною 0. Розташування полюсів і нулів на комплексній  $p$ -площині визначає характер власного (вільного) руху системи.

Розглянемо приватний випадок, коли  $K/M = 2$  і  $B/M = 3$ . Тоді вираз (3.25) прийме наступний вигляд:

$$Y(p) = \frac{(p+3)y_0}{(p+1)(p+2)}. \quad (3.24)$$

Положення полюсів і нулів цієї функції на  $p$ -площині наведено на рис 3.5. Розкладемо вираз 3.24 на елементарні дроби, отримаємо:

$$Y(p) = \frac{K_1}{p+1} + \frac{K_2}{p+2}. \quad (3.25)$$

де  $K_1$  і  $K_2$  – коефіцієнти розкладання.

Коефіцієнти  $K$  будемо називати лишком і визначати шляхом множення (3.24) на член знаменника, який відповідає  $K$  і присвоєння змінної  $p$  значення, рівного даному полюсу.



**Рисунок 3.5. – Розташування полюсів та нулів на  $p$ -площині**

Так, якщо прийняти  $y_0 = 1$  то обчислення коефіцієнта  $K$  дає:

$$k_1 = \frac{(p-p_1)P(p)}{q(p)} \Big|_{p=p_1} = \frac{(p+1)(p+3)}{(p+1)(p+2)} \Big|_{p=p_1} = 2 \quad (3.26)$$

Аналогічним чином одержимо значення  $K_2 = -1$ . Інший спосіб знаходження лишків  $Y(p)$  у відповідних полюсах базується на графічних операціях, які будемо виконувати на  $p$ -площині.

Так, наприклад (3.26) можливо записати в вигляді:

$$k_1 = \frac{(p+3)}{(p+2)} \Big|_{p=p_1=-1} = \frac{(p_1+3)}{(p_1+2)} \Big|_{p_1=-1} = 2 \quad (3.27)$$

Графічна презентація виразу (3.27) наведена на рис 3.6. Графічний метод знаходження лишків має особливу цінність у тих випадках, коли характеристичне рівняння має високий порядок і коли деякі полюси утворюють комплексно-спряженні пари.

Після цього використовуємо перетворення Лапласа до виразу (3.24).

$$y(t) = L^{-1} \left\{ \frac{2}{p+1} \right\} + L^{-1} \left\{ \frac{-1}{p+2} \right\}, \quad (3.28)$$

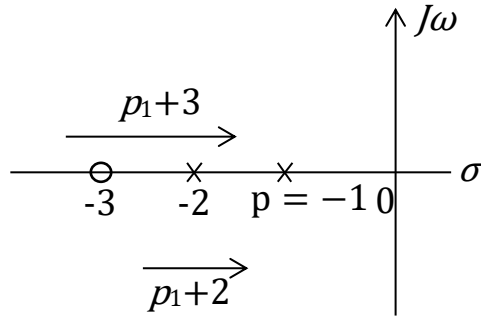
За допомогою табл. 3.2 знаходимо:

$$y(t) = 2e^{-t} - e^{-2t}. \quad (3.29)$$

Іноколи необхідно знайти кінцеве значення  $y(t)$ . Для цього потрібно використати теорему про кінцеве значення. Запишемо цю теорему у вигляді рівняння:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \lim_{p \rightarrow 0} y(p), \quad (3.30)$$

У виразі (3.30) допускається наявність простого полюсу  $y(p)$  на початку координат. У той же час не допускається наявність полюсів на уявній осі та праворуч від осі  $0-j\omega$ , а також кратних полюсів на початку координат.



**Рисунок 3.6. – Графічне визначення лишків**

Відповідно до системи (рис. 3.1) одержимо:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \lim_{p \rightarrow 0} y(p) = 0, \quad (3.31)$$

тобто кінцеве положення маси відповідає положенню рівноваги  $y = 0$ .

Для того щоб краще вивчити метод перетворення Лапласа, розглянемо ще один випадок на прикладі системи маса-пружина для випадку недодемпфування руху.

Вираз для  $y(p)$  можна записати у вигляді рівняння виду:

$$y(p) = \frac{(p + \frac{B}{M})y_0}{p^2 + (\frac{B}{M})p + (\frac{K}{M})} = \frac{(p + 2\xi\omega_n)y_0}{p^2 + 2\xi\omega_n p + \omega_n^2}, \quad (3.32)$$

де  $\xi$  – безрозмірний коефіцієнт затування;

$\omega_n$  – власна частота коливань системи.

Корені характеристичного рівняння дорівнюють:

$$p_{1,2} = -\xi\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\xi^2 - 1}, \quad (3.33)$$

де, у нашому випадку,  $\omega_n = \sqrt{K/M}$  та  $\xi = B/2\sqrt{KM}$ .

Якщо  $\xi > 1$ , то корені є дійсними, при  $\xi < 1$  корені є комплексно-спряжені.

При  $\xi = 1$  корені є дійсними і кратними, що відповідає критичному затуванню.

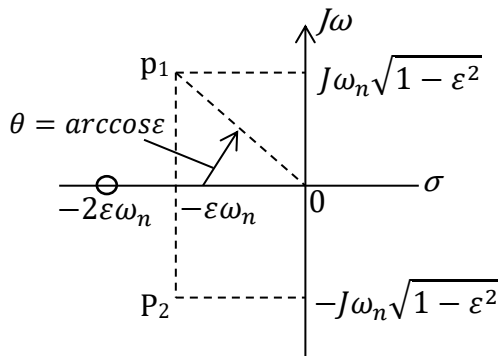
Якщо  $\xi < 1$ , то реакція системи є недодемпфованою, і тоді:

$$p_{1,2} = -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1 - \xi^2}. \quad (3.34)$$

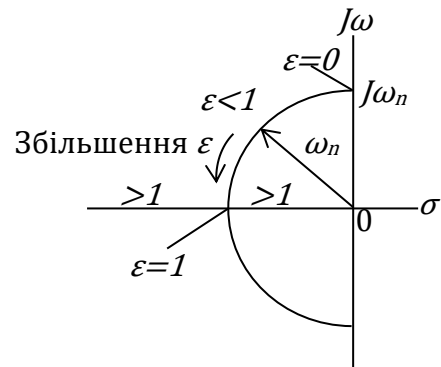
На рис 3.7 наведено розташування полюсів і нуля функції  $y(p)$ , де  $B = \omega_n \arccos \xi$ .



При зміні  $\xi$  і збереженні постійними значень  $\omega_n$ , комплексно-спряжених полюсів, що рухаються по колу, як наведено на рис 3.8, перехідна характеристика все більше набуває коливального характеру по мірі того, як полюси наближаються до уявної осі при  $\xi \rightarrow 0$ .



**Рисунок 3.7.** – Розташування на  $p$ -площині полюсів і нуля  $Y(p)$



**Рисунок 3.8.** – Переміщення полюсів при зміні  $\epsilon$  та умови  $\omega_n = \text{const}$

Зворотне перетворення Лапласа можна знайти шляхом графічного визначення залишків.

Розкладення (3.32) на елементарні дроби дає:

$$y(p) = \frac{K_1}{p-p_1} + \frac{K_1^*}{p-p_1^*}. \quad (3.35)$$

Оскільки  $p_1$  і  $p_2$  є комплексно-спряженими, то залишок  $K_2$  також є комплексно-спряженим лишком  $K_1$  і тоді одержуємо:

$$y(p) = \frac{K_1}{p-p_1} + \frac{K^*}{p-p_1^*},$$

Де зірочка означає комплексно-спряжене значення.

На основі рис.3.9 лишок  $K_1$  знаходиться наступним чином:

$$K_1 = \frac{y_0(p+2\xi\omega_n)}{p_1-p_1^*} = \frac{y_0 M_1 e^{j\theta}}{M_2 e^{j\pi/2}}, \quad (3.36)$$

де  $M_1$  – модуль  $(p + 2\xi\omega_n)$ ;

$M_2$  – відповідний модуль  $p_1 - p_1^*$ .

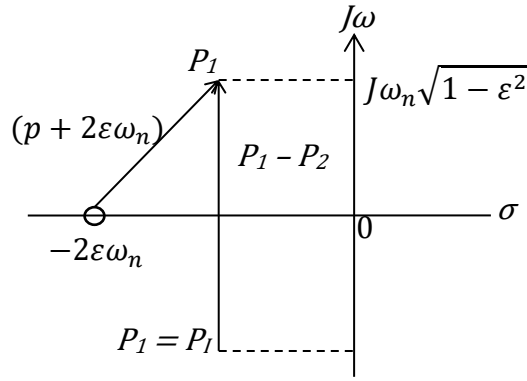


Рисунок 3.9. – Визначення лишку  $K_1$

У нашому випадку ми одержимо:

$$K_1 = \frac{y_0 \omega_n e^{j\theta}}{2\omega \sqrt{1-\xi^2} e^{j\pi/2}} = \frac{y_0}{2\sqrt{1-\xi^2} e^{j(\frac{\pi}{2}-\theta)}}, \quad (3.37)$$

де  $\theta = \arccos \xi$ .

Відповідно,

$$K_2 = \frac{y_0}{2\sqrt{1-\xi^2}} e^{j(\frac{\pi}{2}-\theta)}. \quad (3.38)$$

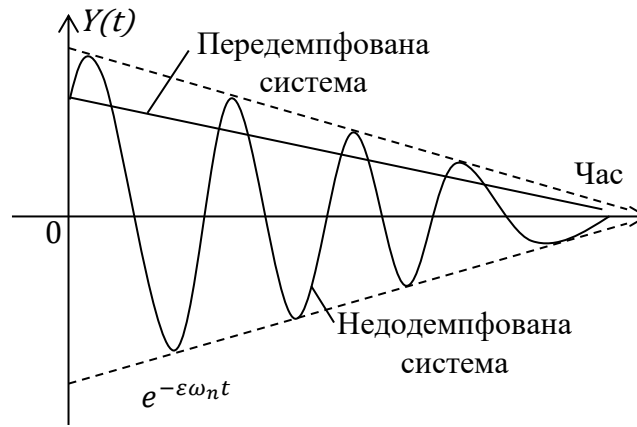
У кінцевому рахунку, якщо ввести позначення  $2\sqrt{1-\xi^2} = \beta$ , одержимо:

$$\begin{aligned} y(t) &= K_1 e^{p_1 t} + K_2 e^{p_2 t} = \\ &= \frac{y_0}{2\sqrt{1-\xi^2}} \left( e^{j(\theta-\frac{\pi}{2})} e^{-\xi \omega_n t} e^{j\omega_n t} + e^{j(\frac{\pi}{2}-\theta)} e^{-\xi \omega_n t} e^{-j\omega_n t} \right) = \\ &= \frac{y_0}{2\sqrt{1-\xi^2}} e^{j\omega_n t} \sin(\omega_n \sqrt{1-\xi^2} t + \theta) \end{aligned} \quad (3.39)$$

Аналогічний результат можна отримати за допомогою табл. 3.2.

Перехідна характеристика для випадку передемпфікування ( $\xi > 1$ ) та недодемпфікування ( $\xi < 1$ ) системи наведена на рис 3.10. Перехідній характеристиці властиво при  $\xi < 1$  зменшення з часом амплітуди коливань, а тому будемо її називати затуханням коливань.

Таким чином, використання перетворення Лапласа в процесах синтезу автоматизованих систем керування та використання  $p$ -площини є дуже цінним методом аналізу й синтезу, особливо тоді, коли акцент зроблено на визначення перехідних режимів і точність в сталому становищі.



**Рисунок 3.10. – Перехідна характеристика системи маса-пружина**

***Контрольні запитання:***

1. Яким чином одержують диференціальні рівняння, що описують динаміку фізичної систем?
2. Методи та умови лінеаризації.
3. Назвіть існуючі форми запису лінійних диференціальних рівнянь.
4. Переваги принципу суперпозиції.
5. Використання перетворення Лапласа в процесах синтезу САК.
6. Назвіть декілька важливих перетворень Лапласа.
7. Метод одержання характеристичного рівняння.
8. Зворотне перетворення Лапласа.
9. Перехідна характеристика системи. Коли перехідна характеристика все більше набуває коливальний характер.

## Тема 4. Передавальні функції лінійних систем

### 4.1. Загальні положення теорії

Передавальна функція лінійної системи визначається як відношення перетворення Лапласа вихідної змінної до перетворення Лапласа вхідної змінної за умови, що всі початкові умови дорівнюють нулю. Передавальна функція системи (або елемента) однозначно описує динамічний зв'язок між цими змінними [2,3,4,5,9,21].

Передавальна функція існує лише для лінійних стаціонарних (з постійними параметрами) систем. У нестаціонарних системах один або декілька параметрів залежать від часу, а тому перетвореннями Лапласа користуватись не можна.

Передавальна функція описує поведінку системи в межах вхід-вихід і не несе якої-небудь інформації про внутрішні зміни, а головне, про характер цих змін. Розглянемо простий приклад RC-мережі, наведеної на рис 4.1, з метою визначення передавальної функції.

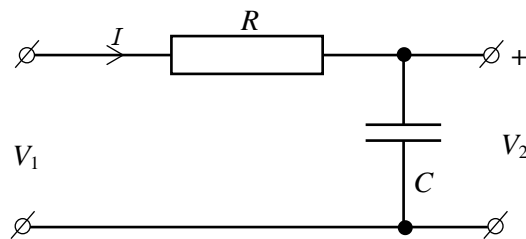


Рисунок 4.1. – RC-мережа

Передавальна функція RC-мережі, що наведена на рис 4.1, одержана шляхом запису в операційній формі рівнянь Кірхгофа відносно напруг:

$$V_1(p) = \left( R + \frac{1}{Cp} \right) I(p) \quad (4.1)$$

та

$$V_2(p) = I(p) \frac{1}{Cp}. \quad (4.2)$$

Після перетворень запишемо:

$$V_2(p) = \frac{1/Cp}{R+1/Cp} V_1(p),$$

тоді передавальна функція буде мати вигляд:

$$W(p) = G(p) = \frac{V_2(p)}{V_1(p)} = \frac{1}{RCp+1} = \frac{1}{\tau p+1} = \frac{1/\tau}{p+1/\tau}, \quad (4.3)$$

де  $RC$  – є постійною часу мережі.

Лише один полюс функції  $S(p)$ , буде дорівнювати  $p = -1/\tau$ .

Багатоконтурна електрична мережа або подібна їй механічна система з декількома масами описуються системою рівнянь відносно змін, перетворення Лапласа. Обчислити рівняння звичайно можна за допомогою матриць і визначників [3,9].

Після цього розглянемо приклад поведінки системи високого порядку й визначимо її реакцію на вхідний сигнал після затухання власних (вільних рухів). Нехай диференціальне рівняння системи буде мати вигляд:

$$\frac{d^n y}{dt^n} + q_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + K + q_0 Y = p_{n-1} \frac{d^{n-1} z}{dt^{n-1}} + p_{n-2} \frac{d^{n-2} z}{dt^{n-2}} + K + p_0 z, \quad (4.4)$$

де  $Y(t)$  – реакція системи;

$z(t)$  – вхідний сигнал, тобто функція збурення.

Якщо всі початкові умови рівні нулю, то вхід системи можна зв'язати передавальною функцією:

$$Y(p) = G(p)R(p) = \frac{P(p)}{q(p)} = \frac{P_{n-1}P^{n-1} + P_{n-2}P^{n-2} + K + P_0}{P^n + q_{n-1}P^{n-1} + \dots + q_0} R(p). \quad (4.5)$$

Реакція системи складається з вільного руху (визначається початковими умовами) та необхідного руху, обумовленого вхідним сигналом. У результаті можна записати:

$$Y(p) = \frac{m(p)}{q(p)} + \frac{P(p)}{q(p)} R(p), \quad (4.6)$$

де  $q(p) = 0$  є характеристичні рівняння системи.

Якщо зображення по Лапласу вхідного сигналу представляє собою дробову раціональну функцію:

$$R(p) = \frac{n(p)}{d(p)}, \text{ то тоді}$$

$$Y(p) = \frac{m(p)}{q(p)} + \frac{P(p)n(p)}{q(p)d(p)} = Y_1(p) + Y_2(p) + Y_3(p), \quad (4.7)$$

де  $Y_1(p)$  – складова, яка характеризує вільний рух;

$Y_2(p)$  – складова, обумовлена множниками  $q(p)$ ;

$Y_3(p)$  – складова, яка включає в себе співмножники  $d(p)$ .

Зворотнє перетворення Лапласа дає таке значення:

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t) + y_3(t). \quad (4.8)$$

У цьому випадку перехідний процес обумовлений складовими  $y_1(t) + y_2(t)$ , а  $y_3(t)$  є сталим рухом системи.

Розглянемо систему, яка описана диференціальним рівнянням виду:

$$\frac{d^2y}{dt^2} + 4\frac{dy}{dt} + 3y = 2z(t), \quad (4.9)$$

з початковими умовами  $y(0) = 1, \left. \frac{dy}{dt} \right|_{x=0} = 0$ , коли  $z(t) = 1, t \geq 0$ .

Перетворивши ці рівняння по Лапласу, одержимо:

$$[p^2Y(p) + py(0)] + 4[pY(p) - y(0)] + 3Y(p) = 2R(p),$$

оскільки  $R(x) = \frac{1}{p}$ , а  $y(0) = 1$ , то

$$Y(p) = \frac{p+4}{p^2+4p+3} + \frac{2}{p(p^2+4p+3)},$$

де  $q(p) = p^2 + 4p + 3 = (p + 1)(p + 3) = 0$  є характеристичним рівнянням, а  $d(p) = p$ .

Тоді розкладання  $Y(p)$  на прості дроби дає:

$$Y(p) = \left[ \frac{3/2}{p+1} - \frac{1/2}{p+3} \right] + \left[ \frac{1/3}{p+3} - \frac{1}{p+1} \right] + \frac{2/3}{p} = Y_1(p) + Y_2(p) + Y_3(p). \quad (4.10)$$

Отже, реакція системи може бути описаною рівнянням виду:

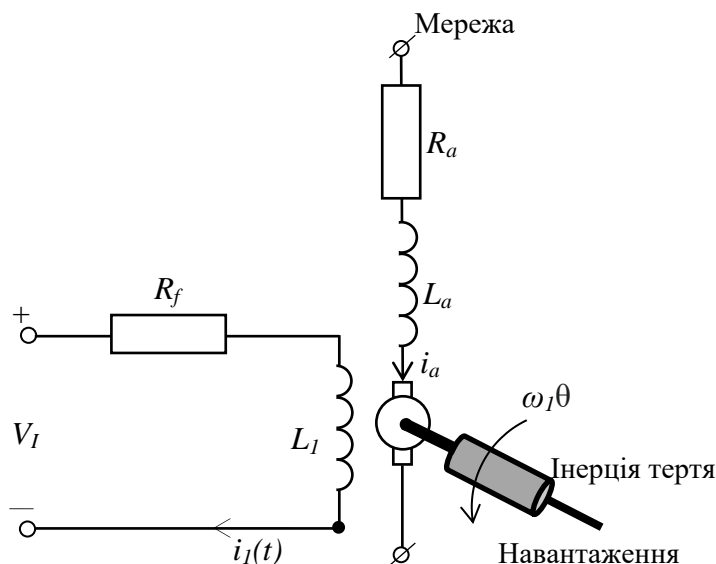
$$y(t) = \left[ \frac{3}{2}e^{-t} - \frac{1}{2}e^{-3t} \right] + \left[ \frac{1}{3}e^{-3t} - e^{-t} \right] + \frac{2}{3}, \quad (4.11)$$

а у сталому режимі:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \frac{2}{3}. \quad (4.12)$$

У якості ще одного прикладу одержимо передавальну функцію дуже важливого елемента систем керування – двигуна постійного струму. Ці двигуни часто використовують у вигляді виконавчих пристроїв. Виконавчий пристрій – це елемент системи керування, який забезпечує надходження на вхід об'єкта керування сигналу достатньої потужності.

Схема двигуна постійного струму наведена на рис 4.2. Двигун перетворює електричну енергію постійного струму в механічну енергію обертового руху. Основна частина моменту, яка створена ротором (якорем) двигуна, використовується для керування зовнішнім навантаженням. Передавальну функцію двигуна постійного струму (ДПС) ми одержимо шляхом лінійної апроксимації реальних характеристик, не беручи до уваги такі ефекти, як гістерезис і падіння напруги на щітках. Вхідну напругу подають на обмотку збудження або на якір.



**Рисунок 4.2. – Двигун постійного струму  
(еквівалентна електрична схема)**

Якщо відсутнє насичення, то магнітний потік у повітряному зазорі пропорційний струму збудження, тобто:

$$\Phi = R_f i_f. \quad (4.13)$$

Будемо вважати, що момент, який розвиває двигун, лінійно залежить від  $\Phi$  і струму якоря:

$$T_m = K_I \Phi i_a(t) = K_1 K_f i_a(t) i_a(t). \quad (4.14)$$

Із рівняння (4.14) витікає, що для того щоб двигун можливо було вважати лінійним елементом, спочатку будемо розглядати випадок, коли двигун будемо керувати по мережі збудника, за рахунок цього буде забезпечено значне підсилення потужності.

Перетворивши (4.14) по Лапласу, одержимо:

$$T_m(t) = (K_I K_f I_a) I_f(P) = K_m I_f(P), \quad (4.15)$$

де  $i_a = I_a$  – постійний струм якоря;  
 $K_m$  – постійна електродвигуна.

Струм збудження зв'язаний з напругою збудження співвідношенням:

$$V_f(p) = (R_f + L_f p) I_f(p). \quad (4.16)$$

Момент, який розвиває двигун, прикладемо до навантаження. При цьому запишемо:

$$T_m(p) = T_L(p) + T_a(p), \quad (4.17)$$

де  $T_L(p)$  – момент навантаження;  
 $T_a(p)$  – збурений момент.

Момент навантаження у випадку його обертового руху запишемо так:

$$T_1(p) = J p^2 \theta(p) + B_p \theta(p). \quad (4.18)$$

Після перетворень з врахуванням (4.16, 4.17, 4.18) маємо:

$$T_L(p) = T_m(p) - T_a(p); \quad (4.19)$$

$$T_m(p) = K_m I_f(p); \quad (4.20)$$

$$I_f(p) = \frac{V_f(p)}{R_f + L_f p}. \quad (4.21)$$

Відповідно, при  $T_a(p) = 0$  передавальна функція двигуна дорівнює:

$$\frac{\theta(p)}{V_f(p)} = \frac{K_m}{p(Jp+b)(L_f p + R_f)} = \frac{K_m/JL_f}{p(p+b/J)(p+R_f/L_f)}, \quad (4.22)$$

де  $\tau_f = L_f / R_f$  і  $\tau_L = J / b$ , а  $\tau_L > \tau_f$ .

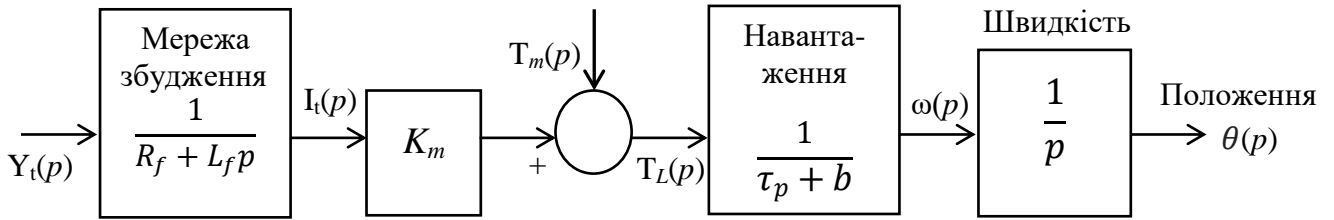
Модель електродвигуна, керована по мережі збудження, у вигляді структурної схеми наведена на рис 4.3.

Альтернативний вираз для передавальної функції можна одержати, якщо ввести постійні часу  $\tau_t$  та  $\tau_L$ . Тоді одержимо:

$$\frac{\theta(p)}{V_t(p)} = G(p) = \frac{K_m/b R_t}{p(\tau_t p + 1)(\tau_L p + 1)}, \quad (4.23)$$

де  $\tau_t = L_t / R_t$  і  $\tau_L = J / b$ , а  $\tau_L > \tau_f$ .





**Рисунок 4.3. – Структурна схема двигуна, керованого по мережі збудження**

Наведемо систему рівнянь, які описують режими роботи двигуна:

$$T_m(p) = (K_I K_t I_j) I_\alpha(p) = K_m I_\alpha(p); \quad (4.24)$$

$$T_m(p) = K_m I_\alpha(p); \quad (4.25)$$

$$V_\alpha(p) = (R_\alpha + L_\alpha p) I_\alpha(p) + V_b(p). \quad (4.26)$$

де  $K_m$  – коефіцієнт, який залежить від магнітної проникливості;  
 $V_b(p)$  – проти-ЕРС, пропорційна швидкості обертання.

Отже,

$$V_b(p) = K_b \omega(p) \quad (4.27)$$

і струм якоря дорівнює:

$$I_\alpha(p) = \frac{V_\alpha(p) - K_b \omega(p)}{R_\alpha + L_\alpha p}. \quad (4.28)$$

Із рівнянь (4.19) – (4.20) одержимо вираз для моменту навантаження:

$$T_L(p) = J p^2 \theta(p) + b p \theta(p) = T_m(p) - T_d(p). \quad (4.29)$$

Зв'язок між змінними, які характеризують динаміку двигуна, керованого по мережі якоря, схематично наведена на рисунку 4.9.

За допомогою рівнянь 4.24, 4.25, 4.26, 4.29 та вважаючи, що  $T_d(p) = 0$ , одержимо передавальну функцію двигуна:

$$G(p) = \frac{\theta(p)}{V_\alpha(p)} = \frac{K_m}{p[(R_\alpha + L_\alpha p)(j p + b) + K_b K_m]} = \frac{K_m}{p(p^2 + 2\varepsilon \omega_n p + \omega_n^2)}. \quad (4.30)$$

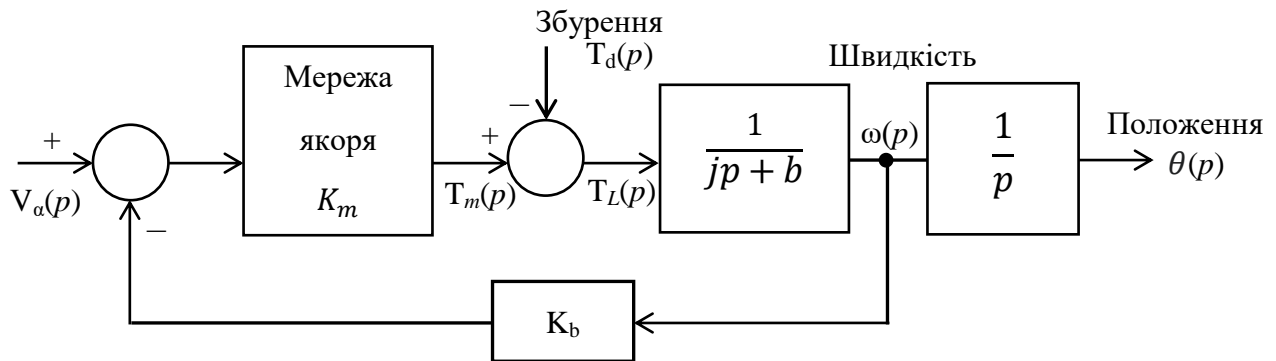
Для багатьох двигунів постійний час якоря,  $\tau = L_\alpha / R_\alpha$ , можна не враховувати, тоді:

$$G(p) = \frac{\theta(p)}{V_\alpha(p)} = \frac{K_m}{p[R_\alpha(j p + b) + K_b K_m]} = \frac{K_m / (R_\alpha b + K_b K_m)}{p(\tau_1 p + 1)}, \quad (4.31)$$

де еквівалентна постійна часу:

$$\tau_I = R_\alpha J / (R_\alpha b + K_b K_m). \quad (4.32)$$

Цікаво відзначити, що  $K_b = K_m$ . Це можна показати, якщо розглядати сталий режим роботи двигуна та баланс потужностей. Потужність, яка підведена до якоря дорівнює  $K_b \omega J_\alpha$ , а потужність на валу дорівнює  $T_\omega$ . У стійкому режимі ці потужності рівні, тому що  $K_b \omega J_\alpha = T_\omega$  і, оскільки  $T = K_m J_\alpha$  (див. (4.19)), то тоді  $K_b = K_m$ .



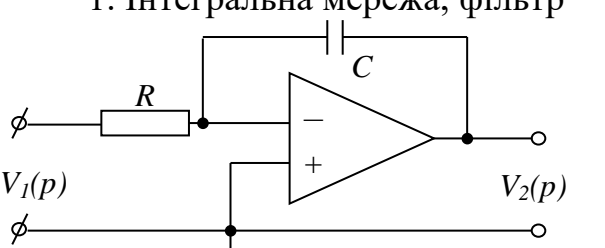
**Рисунок 4.4.– Структурна схема двигуна, в якій є система керування по мережі якоря**

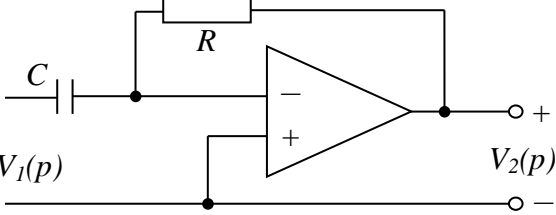
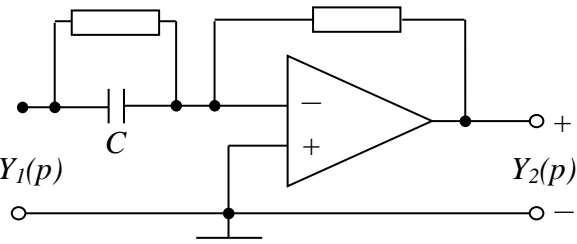
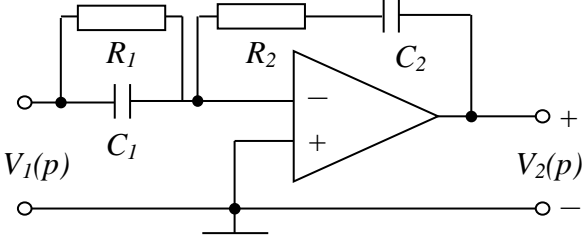
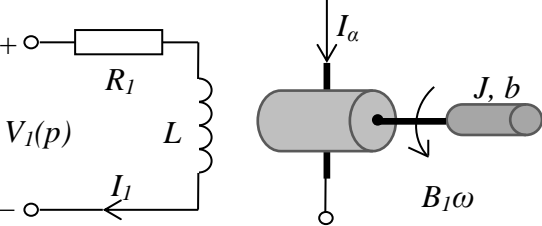
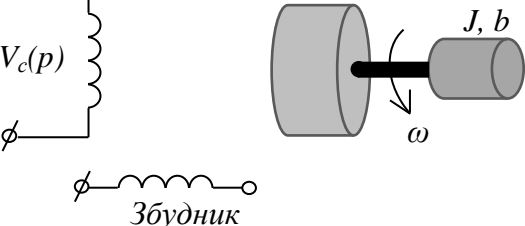
Поняття передавальної функції і побудовані на ній методи є дуже важливими, оскільки вони надають суттєву інформацію дослідникам і проєктантам про математичні моделі елементів систем керування.

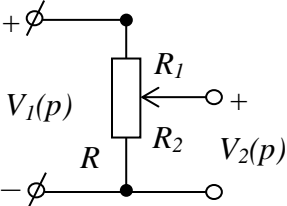
Особлива цінність передавальної функції полягає в тому, що її нулі та полюси на  $p$ -площині дають повне уявлення про вид перехідної характеристики системи. В таблиці 4.1 наведені передавальні функції деяких динамічних елементів.

**Таблиця 4.1.**

**Передавальні функції динамічних елементів та мережі**

Елемент чи система	$G(p)$
<p>1. Інтегральна мережа, фільтр</p> 	$\frac{V_2(p)}{V_1(p)} = \frac{1}{RCP}$

Елемент чи система	$G(p)$
<p>2. Диференціальна мережа</p> 	$\frac{V_2(p)}{V_1(p)} = -RCp$
<p>3. Диференціальна мережа</p> 	$\frac{Y_2(p)}{Y_1(p)} = \frac{R_2(R_1 Cp + 1)}{R_1}$
<p>4. Фільтр з інтегруванням</p> 	$\frac{V_2(p)}{V_1(p)} = \frac{(R_1 C_1 p + 1)(R_2 C_2 p + 1)}{R_1 C_2 p}$
<p>5. Двигун постійного струму з керуванням по мережі збудження</p> 	$\frac{\theta(p)}{V_j(p)} = \frac{K_m}{p(Jp + B)(L_f p + R_f)}$
<p>6. Двофазний двигун змінного струму</p> 	$\frac{\theta(p)}{V_c(p)} = \frac{K_m}{p(\tau p + 1)}$ $\tau = \frac{J}{(b - m)}$ <p><math>m</math> – нахил лінеаризованої залежності швидкості від моменту навантаження (звичайно від'ємний)</p>

Елемент чи система	$G(p)$
<p>7. Потенціометр</p> 	$\frac{V_2(p)}{V_1(p)} = \frac{R_2}{R} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ $\frac{R_2}{R} = \frac{\theta}{\theta_{max}}$

#### 4. 2. Структурні схеми

Динамічні системи, в тому числі і системи автоматичного керування на мові математики описані раніше системою звичайних диференціальних рівнянь.

Як було відзначено в попередніх розділах, використання перетворення Лапласа зводить задачу рішення диференціальних рівнянь до рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Оскільки в системах керування шляхом заміни одних змінних виконується вплив на інші змінні, то необхідно встановити зв'язок між цими змінними. Такий зв'язок представляють у вигляді передавальної функції, яка є одним із основних понять теорії керування.

Переваги передавальної функції полягають у тому, що вона дозволяє побудувати причинно-наслідкові зв'язки між змінними і наочними схемами.

В теорії керування часто уявлення різних динамічних систем виконують у вигляді структурних схем [3,5,9].

Структурна схема складається із блоків направленої дії, кожному із яких відповідає визначена передавальна функція. На рис 4.5 показана структурна схема двигуна постійного струму, який керований по мережі збудника. Така схема віддзеркалює зв'язок між кутом повернення  $\theta(p)$  і напругою  $V_f(p)$ .

З метою опису системи з декількома керованими змінними використовується структурна сема з перехресними зв'язками. Наприклад, на рис 4.6 наведені дві вхідні і дві вихідні змінні. За допомогою передавальних функцій ми зможемо записати такі рівняння:

$$Y_1(p) = G_{11}(p)R_1(p) + G_{12}(p)R_2(p), \quad (4.33)$$

$$Y_2(p) = G_{21}(p)R_1(p) + G_{22}(p)R_2(p), \quad (4.34)$$

де  $G_{ij}(p)$  – передавальна функція від  $J$ -го входу до  $i$ -го виходу.

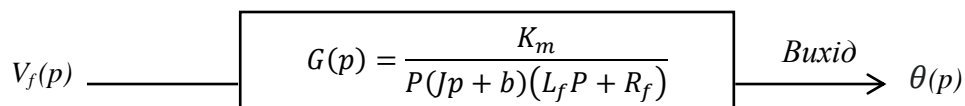
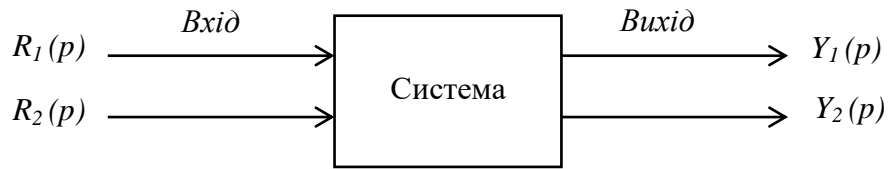
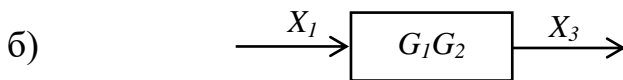
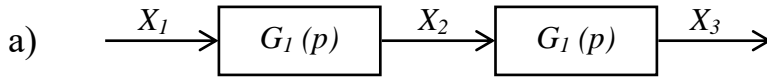


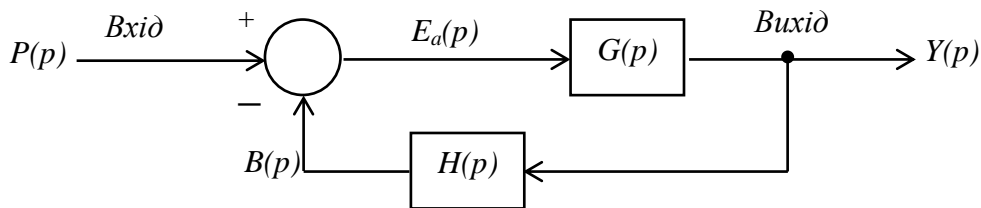
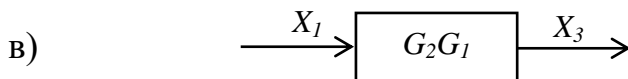
Рисунок 4.5. – Структурна схема двигуна постійного струму



**Рисунок 4.6.** – Система з двома входами та двома виходами



або



**Рисунок 4.7.** – Система із від’ємним зворотнім зв’язком

Структурна схема, представлена на рис. 4.7, віддзеркалює записані вище рівняння. У загальному випадку, за наявності  $J$  входів і  $I$  виходів, зв’язаних рівняннями, можна записати їх у матричній формі:

$$\begin{bmatrix} Y_1(p) \\ Y_2(p) \\ \vdots \\ Y_I(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(p) & K & G_{1J}(p) \\ G_{21}(p) & K & G_{2J}(p) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ G_{I1}(p) & K & G_{IJ}(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1(p) \\ R_2(p) \\ \vdots \\ R_I(p) \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

або у компактному вигляді

$$Y = GR, \quad (4.36)$$

де  $Y_I$  і  $R_I$ , відповідно, стовпці матриці, елементами яких є  $J$  вхідних та  $I$  вихідних змінних;

$G$  – матрична передавальна функція розмірності  $I \times J$ .

Матричне уявлення має особливу цінність стосовно аналізу багатомірних систем користування з великою кількістю взаємних зв'язків. Тому знання вищої алгебри (матричних обчислень) допоможуть проводити синтез структурних схем систем з різними зв'язками [2,3,9].

Користуючись визначеними правилами, структурну схему складної системи можна спростити, звівши її до конфігурації з меншим числом блоків, ніж у вихідній системі, оскільки передавальна функція є засобом опису лінійних динамічних систем, яким притаманні властивості комутативності.

Якщо представити систему у вигляді послідовного з'єднання блоків (рис. 4.7), то можна записати рівняння виду:

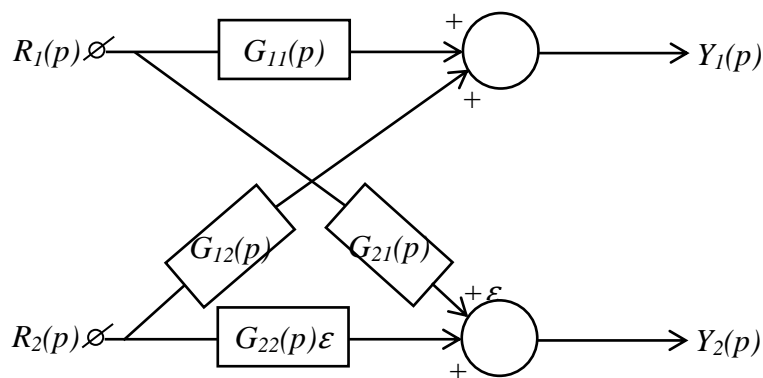
$$X_3(p) = G_2(p)X_2(p) = G_1(p) G_2(p) X_1(p). \quad (4.37)$$

Якщо два блока з'єднані послідовно, то попереднє рівняння можна записати також у вигляді:

$$X_3(p) = G_2(p)G_1(p) G_2(p) X_1(p). \quad (4.38)$$

При цьому будемо вважати, що якщо перший блок з'єднаний з входом другого, то вплив навантаження на перший блок є незначним. Якщо навантаження впливає значно на вихідну змінну попереднього блоку, то дослідник повинен врахувати цей фактор і внести відповідні зміни в передатну функцію.

Методи перетворення структурних схем побудовані на дослідженні алгебраїчних співвідношень між окремими змінними. Наприклад, розглянемо структурну схему, яка наведена на рис. 4.8.



**Рисунок 4.8.** – Структурна схема системи з перехресними зв'язками

У цій системі від'ємний зворотній зв'язок – сигнал на вході системи керування – запишемо у вигляді:

$$E_a(p) = R(p) - B(p) = R(p) - H(p) Y(p). \quad (4.39)$$

Оскільки вихідна змінна зв'язана з цим сигналом передавальною функцією  $G(p)$ , то

$$Y(p) = G(p)E_a(p) \quad (4.40)$$

і, відповідно,

$$Y(p) = G(p)[R(p) - H(p)Y(p)]. \quad (4.41)$$

Групуючи члени при  $Y(p)$ , одержимо:

$$Y(p)[1 + G(p)H(p)] = G(p)R(p). \quad (4.42)$$

Звідси одержимо передавальну функцію, яка зв'язує вихід із входом:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{R(p)} = \frac{G(p)}{1 + G(p)H(p)} \quad (4.43)$$

Цей вираз відомий як передавальна функція замкненої системи, і представляє собою цінність, оскільки він буде властивим для більшості реальних систем керування.

Зведення структурної схеми, представленої на рис. 4.8 до одного блоку, є лише одним із прикладів елементарних перетворень, наведених у таблиці 4.2. Аналіз систем шляхом перетворення структурних схем дає кращі уявлення про внесок кожного елемента, ніж це було б при аналізі рівнянь. Правила перетворення структурних схем ми проаналізуємо на прикладі зведення багатоконтурних систем до більш простих випадків.

### 4.3. Синтез структурних схем

Розглянемо багатоконтурну систему керування технологічним процесом виробництва хліба, наведену на рис. 4.9. У цій системі сигнал  $H_1(p)Y(p)$  надходить на суматор зі знаком плюс, тому контур, утворений блоками  $G_3(p)G_4(p)H_1(p)$  будемо називати контуром з позитивним зворотним зв'язком.

З метою спрощення цієї структурної схеми звернемо увагу на приклад б табл. 4.2. Спочатку, щоб виключити контур  $G_3G_4H_1$ , ми перенесемо вузол через блок  $G_4$  в напрямку руху сигналу (див. правило 4) і одержимо схему, яка наведена на рисунку 4.10а.

Виключивши контур  $G_3G_4H_1$  за правилом 5 ми одержимо схему, наведену на рисунку 4.10, б. Після цього, виключивши внутрішній контур, який має  $H_2/G_4$ , одержимо схему, наведену на рисунку 4.10в. І, нарешті, виключивши контур, який має  $H_3$ , ми одержимо передавальну функцію замкненої багатоконтурної системи, яку наведено на рисунку 4.10г. Звертаємо увагу на вигляд чисельника і знаменника цієї передавальної функції. Бачимо, що чисельник утворений добутком передавальної функції блоків, які знаходяться у

прямій мережі від входу  $R(p)$  до виходу  $Y(p)$ . Знаменник дорівнює одиниці мінус сума добутку передавальних функцій блоків, що утворюють замкнені контури. Добуток  $G_3G_4H_1$  будемо брати зі знаком плюс, оскільки це контур з позитивним зворотним зв'язком, а добуток  $G_1G_2G_3G_4H_3$  і  $G_2G_3H_2$  – зі знаком мінус, тому що в цих контурах зворотний зв'язок від'ємний.

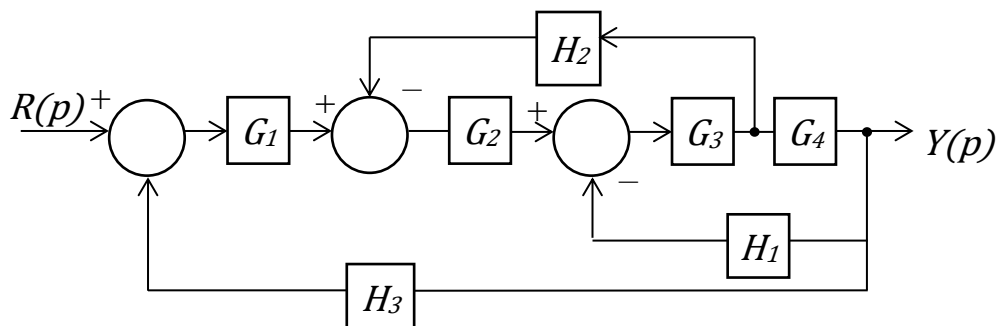


Рисунок 4.9. – Багатоконтурна система керування

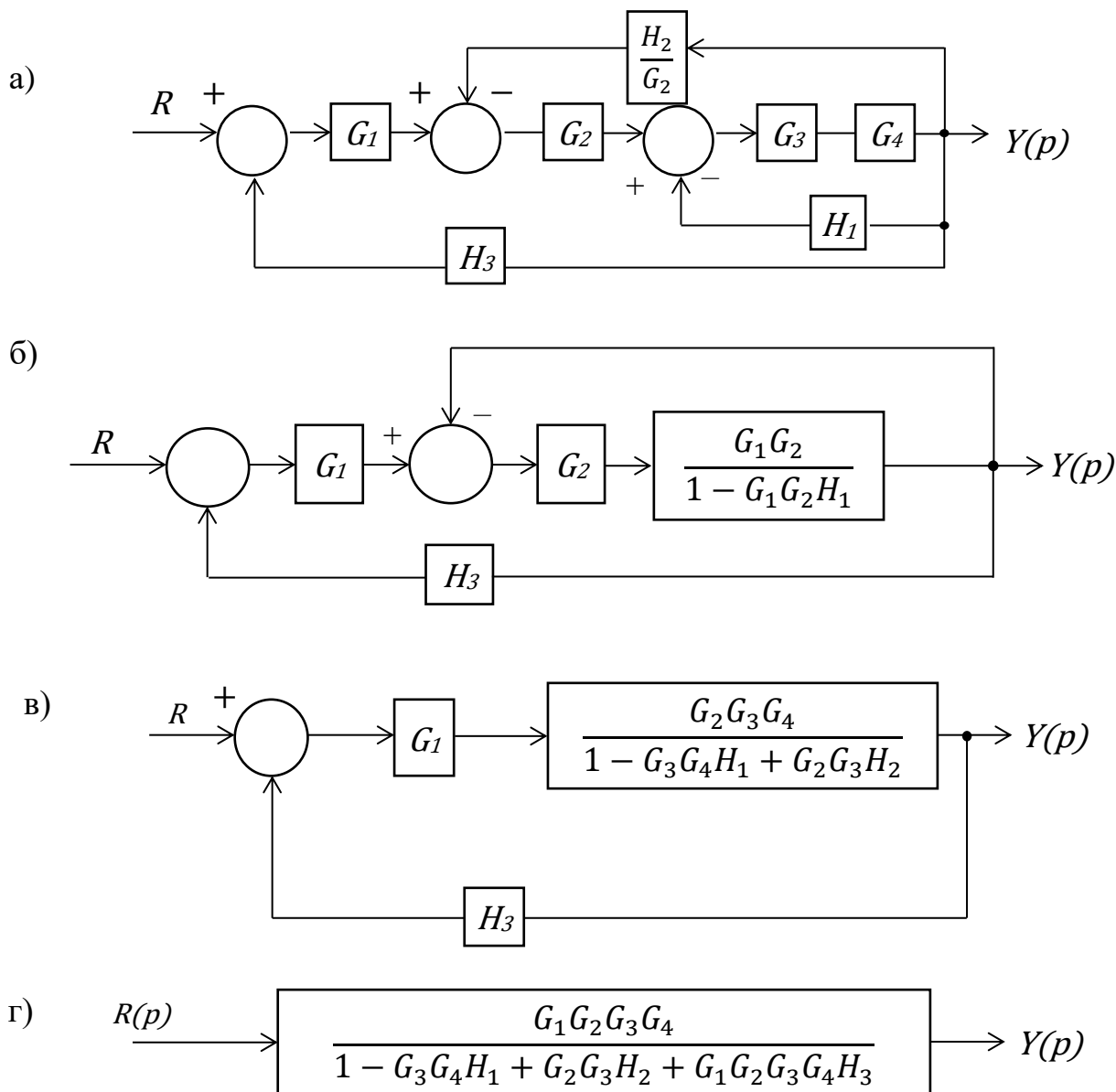


Рисунок 4.10. – Спрощення структурної схеми системи рис. 4.7.



Таблиця 4.2.

## Правила перетворення структурних схем

Перетворення	Вхідна діаграма	Еквівалентна діаграма
1. Послідовне з'єднання блоків		$X_1 \rightarrow [G_1 G_2] \rightarrow X_3$ або $X_1 \rightarrow [G_2 G_1] \rightarrow X_3$
2. Перенесення суматора через блок з передатною функцією проти руху сигналу		
3. Перенесення вузла через блок з передатною функцією проти руху сигналу		
4. Перенесення вузла через блок з передатною функцією по ходу руху сигналу		
5. Перенесення суматора через блок з передатною функцією проти руху сигналу		
6. Виключення контуру зі зворотним зв'язком		$X_1 \rightarrow \left[ \frac{G}{1 \pm GH} \right] \rightarrow X_2$

Щоб краще це продемонструвати, знаменник можна записати у вигляді:

$$q(p) = 1 - (+G_3 G_4 H_1 - G_2 G_3 H_2 - G_1 G_2 G_3 G_4 H_3). \quad (4.44)$$

Як ми побачимо в інших розділах підручника, такий вигляд чисельника і знаменника характерний для багатоконтурних систем керування.

Метод структурних схем широко розповсюджений в теорії і в практиці автоматичного керування [3,5,6, 9]. Він дає наочне графічне уявлення про взаємозв'язок керованих і вхідних змінних. Крім цього, проєктант легко може

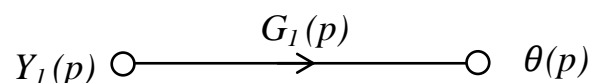
виявити необхідність введення в існуючі структурні схеми додаткових блоків з метою покращення характеристик системи. Разом зі структурними схемами існує альтернативний метод представлення моделі системи у вигляді сигнальних графів.

#### 4.4. Моделі у вигляді сигнальних графів

Структурні схеми графів адекватно представляють взаємозв'язок між керованими та вхідними змінними. Але для систем достатньо складної конфігурації процедура спрощення їх структурних схем у значній ступені є важкоюю та важкоздійсненою. У цьому випадку можна використати сигнальні графи, які представляють зв'язок між змінними.

Перевагою цього методу є те, що завдяки сигнальному графу і спеціальним формулам відразу можна встановити зв'язок між змінними системи.

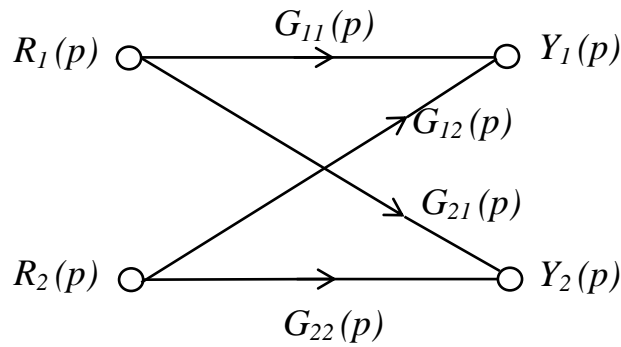
Сигнальний граф представляє собою діаграму, яка складається із вузлів, з'єднаних між собою окремими спрямованими гілками, і є графічним засобом опису лінійних співвідношень між змінними. Сигнальні графи особливо важливі для систем керування зі зворотним зв'язком, оскільки теорія цих систем, у першу чергу, розглядає розповсюдження сигналів і їх перетворень. Основним елементом сигнального графу є односпрямований відрізок, який називається гілкою. Цей відрізок віддзеркалює залежність між вхідними і вихідними змінними подібно тому, як це робить окремий блок у структурній схемі. Наприклад, гілка, яка зв'язує вихід двигуна постійного струму  $\theta(p)$  з напругою збудження  $Y_1(p)$ , наведена на рис. 4.11 (ця схема подібна наведеній на рис. 4.5). Точки входу і виходу на рисунку подібні до клем, які називаємо вузлами.



**Рисунок 4.11. – Сигнальний граф двигуна постійного струму**

Аналогічно, сигнальний граф, який відповідає рівнянням (4.33), (4.34) наведений на рис 4.12. Перетворення кожної змінної характеризується напрямком чинника, нанесеним біля стрілки. Усі гілки, які виходять із вузлів, передають сигнал іншому вихідному вузлу кожної гілки, причому в одному напрямку (односпрямовано).

Сума усіх сигналів, які входять у вузол, утворюють відповідну цьому вузлу змінну. Шлях – це гілка, або послідовність гілок, які можуть бути проведені від одного вузла до іншого. Контур – це замкнений шлях, який починається і закінчується в одному і тому ж вузлі, причому впродовж цього шляху не один інший вузол не зустрічається двічі. Недотичними будемо називати такі контури, які не мають загального вузла.



**Рисунок 4.12. – Сигнальний граф для системи з перехресними зв’язками**

Два дотичних контури мають один або більше загальних вузлів. Звернемося знову до 4.12. Ми можемо записати:

$$Y_1(p) = G_{11}(p) R_1(p) + G_{12}(p) R_2(p); \quad (4.45)$$

$$Y_2(p) = G_{21}(p) R_1(p) + G_{22}(p) R_2(p). \quad (4.46)$$

Сигнальний граф – це наочний метод запису системи алгебраїчних рівнянь, який показує взаємозв’язок між змінними. У якості ще одного прикладу розглянемо наступну систему рівнянь:

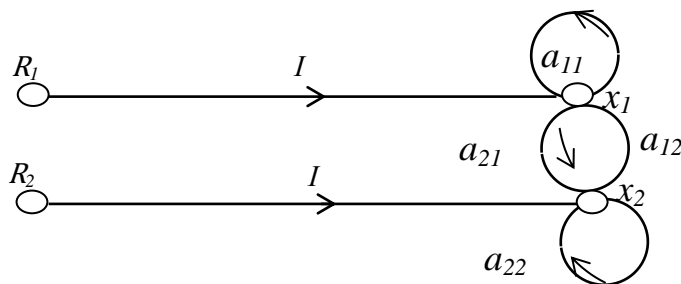
$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + r_1 = x_1; \quad (4.47)$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + r_2 = x_2. \quad (4.48)$$

тут  $r_1$  і  $r_2$  – вхідні змінні;

$x_1$  і  $x_2$  – вихідні змінні.

Сигнальний граф, який відповідає рівнянням (4.47) і (4.48) показано на рис 4.13.



**Рисунок 4.13.– Сигнальний граф для двох алгебраїчних рівнянь**

Рівняння (4.47) і (4.48) запишемо в іншому вигляді:

$$x_1(1 - a_{11}) + x_2(1 - a_{12}) = Z_{11}, \quad (4.49)$$

$$x_1(1 - a_{21}) + x_2(1 - a_{22}) = Z_{12}. \quad (4.50)$$

Якщо обчислити останню систему за правилом Крамера, то одержимо:

$$x_1 = \frac{(1 - a_{22})z_1 + a_{12}z_2}{(1 - a_{11})(1 - a_{22}) - a_{12}a_{21}} = \frac{(1 - a_{22})}{\Delta} r z_1 + \frac{a_{12}}{\Delta} z_{r2}; \quad (4.51)$$

$$x_2 = \frac{(1 - a_{11})z_2 + a_{21}z_1}{(1 - a_{11})(1 - a_{22}) - a_{12}a_{21}} = \frac{(1 - a_{11})}{\Delta} r z_2 + \frac{a_{21}}{\Delta} r z_1. \quad (4.52)$$

У цих рівняннях знаменник дорівнює визначнику, складеному із коефіцієнтів при невідомих, і його можна записати так:

$$\Delta = (1 - \alpha_{11})(1 - \alpha_{22}) - \alpha_{12}\alpha_{21} = 1 - \alpha_{11} - \alpha_{22} + \alpha_{11}\alpha_{22} - \alpha_{12}\alpha_{21}. \quad (4.53)$$

У цьому випадку знаменник дорівнює одиниці мінус коефіцієнти передачі окремих контурів  $\alpha_{11}$ ,  $\alpha_{22}$ ,  $\alpha_{12}$ ,  $\alpha_{21}$  плюс добуток коефіцієнтів передачі двох недотичних контурів  $\alpha_{11}$  і  $\alpha_{22}$ . Конттури  $\alpha_{22}$  і  $\alpha_{12}$   $\alpha_{21}$  є дотичними, також як і конттури  $\alpha_{11}$  і  $\alpha_{21}$   $\alpha_{12}$ .

У розв'язку для  $x_1$  по відношенню до входу  $z_1$  чисельник дорівнює одиниці, помноженій на  $(1 - a_{22})$ , тобто значенню означувача недотичного шляху від  $z_1$  до  $z_2$ . У рішенні для  $x_1$  по відношенню до входу  $z_1$  чисельник дорівнює  $\alpha_{12}$ , оскільки цей шлях відноситься до всіх контурів. Чисельник виразу для  $x_2$  симетричний відповідному чисельнику для  $x_1$ . У загальному випадку лінійна залежність  $T_{ij}$  між незалежною змінною  $x_i$  (її називають вхідною змінною) і залежною змінною  $x_j$  визначається за формулою Мейсона:

$$T_{ij} = \frac{\sum P_{ijk}\Delta_{ijk}}{\Delta}, \quad (4.54)$$

де  $P_{ijk}$  – коефіцієнт передачі  $k$ -го шляху від змінної  $x_i$  до змінної  $x_j$ ;

$\Delta$  – означувач графа;

$\Delta_{ijk}$  – додатковий множник для шляху  $P_{ijk}$ .

Додавання виконується по усім можливим  $k$  шляхам від  $x_i$  до  $x_j$ . Додатковий множник  $\Delta_{ijk}$  дорівнює означувачу всіх дотичних контурів при віддалені  $k$ -го шляху. Означувач  $\Delta$  знаходиться як:

$$\Delta = 1 - \sum_{n=1}^N L_n + \sum_{m=1, q=1}^{M, Q} L_m L_q - \sum L_V L_S L_I + \dots \quad (4.55)$$

де  $L_{ij}$  – коефіцієнт передачі  $q$ -го контуру.

Таким чином, правило обчислення  $\Delta$  через значення  $L_V$ ,  $L_S$ ,  $L_I$ , ...,  $L_N$  наступне:  $\Delta = 1 -$  (сума коефіцієнтів передачі всіх окремих контурів) + (сума добутку всіх можливих комбінацій із двох недотичних контурів) – (сума добутку всіх можливих комбінацій із трьох недотичних контурів) + ....

Формула Мейсона[9] використовується у дещо спрощеному вигляді для визначення зв'язку між вихідною змінною  $Y(p)$  і вхідною змінною  $R(p)$ , тобто:

$$W(p) = T(p) = \frac{\sum_k P_k \Delta_k}{\Delta}, \quad (4.56)$$

де  $T(p) = Y(p)/R(p)$ .

Коефіцієнт передачі шляху  $P_k$  (або  $P_{ijk}$ ) визначається як безперервна послідовність гілок, які простягаються у напрямку, вказаному стрілками, при цьому не один вузол не зустрічається в цій мережі більше одного разу.

Простоту цього методу синтезу систем покажемо на прикладі структурної схеми двигуна, керованого по мережі якоря (рис. 4.4). Ця схема віддзеркалює зв'язок між змінними у вигляді рівнянь виду (4.24 – 4.29).

Сигнальний граф може бути одержаним або на основі цих же рівнянь, або безпосередньо за структурною схемою. Цей граф наведено на рисунку 4.14. Вважаємо, що  $T_\alpha(p) = 0$ , тоді одержимо передавальну функцію  $\Theta(p)/V_\alpha(p)$  за допомогою формули Мейсона. Граф має прямий шлях  $P_1(p)$ , які відносяться до контуру  $L_1(p)$ , де  $P_1(p) = \frac{1}{p} G_1(p)G_2(p)$  і  $L_1(p) = -K_b G_1(p)G_2(p)$ .

Відповідно, передавальна функція має вигляд:

$$T(p) = W(p) = \frac{P_1(p)}{1-L_1(p)} = \frac{(1/p)G_1(p)G_2(p)}{1+K_b G_1(p)G_2(p)} = \frac{K_m}{p(R_\alpha+L_\alpha p)(Jp+b)+K_b K_m}, \quad (4.57)$$

що повністю співпадає з виразом отриманим раніше.

Формула Мейсона дає простий метод аналізу складних систем. Щоб порівняти цей метод із методом спрощення структурних схем, який є не таким і складним методом, на рисунку 4.9 наведена структура багатоконтурної системи. Схема має один прямий шлях  $P_1 = G_1 G_2 G_3 G_4$ . Контури в схемі наступні:

$$L_1 = -G_2 G_3 H_2;$$

$$L_2 = G_3 G_4 H_1;$$

$$L_3 = -G_1 G_2 G_3 G_4 H_3.$$

Всі контури мають загальні вузли, тому вони є дотичними. Крім цього, шлях  $P_1$  відноситься до всіх контурів, тому  $\Delta_1 = 1$ . Тоді передавальна функція замкненої системи визначається виразом:

$$T(p) = W(p) = \frac{Y(p)}{R(p)} = \frac{P_1 \Delta_1}{1-L_1-L_2-L_3} = \frac{G_1 G_2 G_3 G_4}{1+G_2 G_3 H_2 - G_3 G_4 H_1 + G_1 G_2 G_3 G_4 H_3}. \quad (4.58)$$

Розглянемо ще один приклад спрощення структурної схеми складної системи керування. Така система з декількома контурами і прямими шляхами наведена на рис 4.15.

Прямі шляхи наступні:

$$P_1 = G_1 G_2 G_3 G_4 G_5 G_6; P_2 = G_1 G_2 G_7 G_8; P_3 = G_1 G_2 G_3 G_4 G_8.$$

Крім того, маємо наступні контури:

$$L_1 = -G_2G_3G_4G_5H_2; L_2 = -G_5G_6H_1; L_3 = -G_8H_1; L_4 = -G_7H_2G_2;$$

$$L_5 = -G_4H_4; L_6 = -G_1G_2G_3G_4G_5G_6H_3; L_7 = -G_1G_2G_7G_6H_3;$$

$$L_8 = -G_1G_2G_3G_4G_8H_3.$$

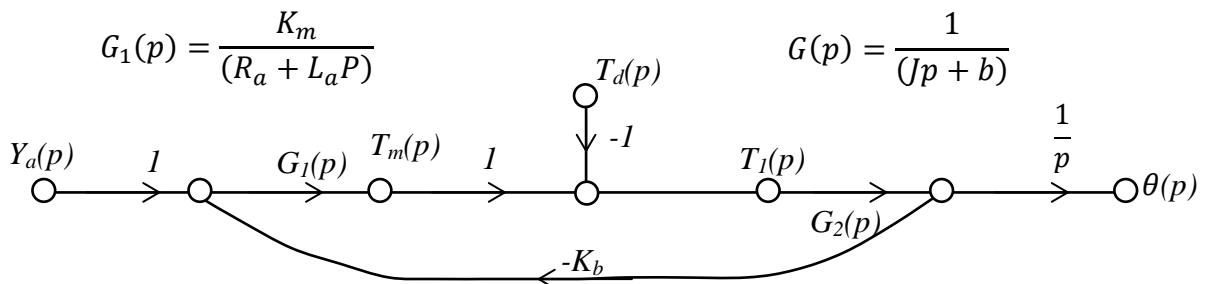
Контур  $L_3$  не дотичний контуру  $L_4$  або контуру  $L_7$ ; контур  $L_3$  не дотичний контуру  $L_4$ , всі інші контури є дотичними. Тому означувач графа:

$$\Delta = 1 - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 + L_7 + L_8) + (L_5L_7 + L_5L_4 + L_3L_4). \quad (4.59)$$

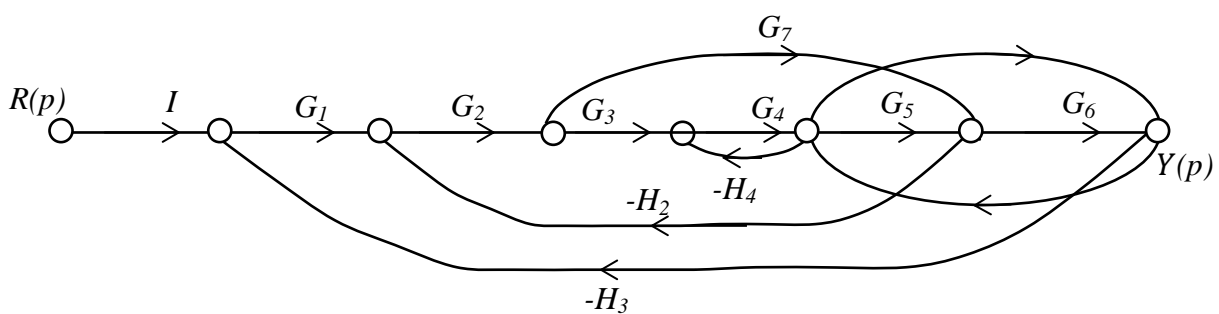
І, нарешті, передавальна функція має вигляд:

$$T(p) = \frac{Y(p)}{R(p)} = \frac{P_1 + P_2\Delta_2 + P_3}{\Delta}. \quad (4.60)$$

На основі цього синтезу побудуємо сигнальний граф багатоконтурної системи керування (рис.4.15)



**Рисунок 4.14. – Сигнальний граф двигуна постійного струму, керованого по мережі якоря**



**Рисунок 4.15. Сигнальний граф багатоконтурної системи керування**

### **Контрольні запитання:**

1. Що називається передавальною функцією лінійної системи?
2. Що таке реакція системи?
3. Цінність передавальної функції. Передавальна функція операційного підсилювача.
4. Переваги передавальної функції.
5. З яких блоків складається структурна схема? Методи перетворення структурних схем.
6. Що представляє собою сигнальний граф? Основний елемент сигнального графу.
7. Сигнальний граф двигуна постійного струму.
8. Наведіть передавальну функцію системи із паралельними шляхами.

## Тема 5. Типові динамічні ланки автоматичних систем, критерії стійкості, регулятори

### 5.1. Подання елементів ланками

Для визначення динамічних властивостей автоматичної системи регулювання необхідно звернутись до матеріалів підручника[5] щоб ознайомитись з динамічними властивостями об'єктів регулювання. При цьому систему розділимо на окремі елементи, що відрізняються один від одного не за функціональною ознакою, а за динамічними властивостями. Такі елементи системи будемо називати ланками. Отже ланкою автоматичної системи будемо називати найпростішу її складову, яка характеризує її динамічну властивість. У ТАР завжди один конструктивний елемент ідентифікується однією ланкою. Елемент може бути поданий комбінацією із кількох ланок. Ланки автоматичних систем є детектуючими, тобто сигнал може проходити через ланку тільки в одному напрямку – від входу до виходу. Це дозволяє розглядати кожну ланку окремо від усієї системи[5].

До динамічних характеристик ланок належить рівняння динаміки, перехідні характеристики та передавальні функції.

У нашому випадку *передавальною функцією* будемо називати відношення вихідної величини ланки до вхідної. Передавальну функцію одержують із диференційного рівняння ланки, при цьому використовують операторну форму запису, яка дає можливість знак диференціювання  $d/dt$  замінити оператором  $p$ . У результаті можна розв'язати диференційне рівняння алгебраїчно. Такий перехід від функції часу  $x(t)$  до її вираження  $X(p)$  зветься прямим перетворенням Лапласа та визначається за формулою:

$$X(p) = \int_0^{\infty} x(t)e^{-pt} dt . \quad (5.1)$$

Зворотна операція переходу від операторного вираження  $X(p)$  до функції  $x(t)$  зветься зворотним перетворенням Лапласа.

Використання перетворення Лапласа значно спрощує розв'язання диференційних рівнянь, наприклад:  $dx/dt = px$ ;  $d^2x/dt^2 = p^2x$ , ...,  $d^n x/dt^n = p^n x$ .

Передавальна функція ланки  $W(p)$  визначається як відношення операторного вираження вихідної величини  $X_{\text{вих}}(p)$  до операторного значення вхідної величини  $X_{\text{вх}}(p)$ :

$$W(p) = X_{\text{вих}}(p)/X_{\text{вх}}(p). \quad (5.2)$$



## 5.2. Ланки лінійних автоматичних систем регулювання

*Аперіодична ланка першого порядку (аперіодична ланка).*

Динамічна характеристика ланки описується диференціальним рівнянням першого порядку:

$$\frac{Tdx_{\text{вих}}}{dt} + x_{\text{вих}} = kx_{\text{вх}} \quad (5.3)$$

де  $T$  – стала часу ланки;

$k$  – коефіцієнт підсилення ланки;

$x_{\text{вих}}$  – вихідна величина ланки;

$x_{\text{вх}}$  – вхідна величина.

Застосуємо операторну форму запису диференціальних рівнянь, тоді рівняння аперіодичної ланки набуде вигляду:

$$Tpx_{\text{вих}} + x_{\text{вих}} = kx_{\text{вх}} \quad (5.4)$$

Визначимо з рівняння (5.4) передавальну функцію аперіодичної ланки таким чином

$$W(p) = k/(1+Tp). \quad (5.5)$$

Перехідна характеристика, або крива розгону ланки, має такий вигляд:

$$x_{\text{вих}} = kx_{\text{вх}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right), \quad (5.6)$$

тобто графіком кривої розгону аперіодичної ланки є експонента (рис. 5.1, *a*). За умов стрибкоподібної зміни вхідної величини ланки вихідна величина змінюється повільно, відстаючи від зміни вхідної, тому аперіодичні ланки будемо називати *інерційними*.

Прикладами інерційних ланок (рис. 5.1, *б–д*) є електродвигун постійного струму з незалежним збудженням (вхідна величина – живильна напруга  $U$ , а вихідна – кутова швидкість обертання  $\omega$ ); термopара (вхідна величина – температура гарячого спаю, вихідна – термо – едс); електричні ланцюги  $RC$  або  $LC$ ; одноємнісні статичні об'єкти, наприклад, напірний бак, у який рідина надходить під рівень.

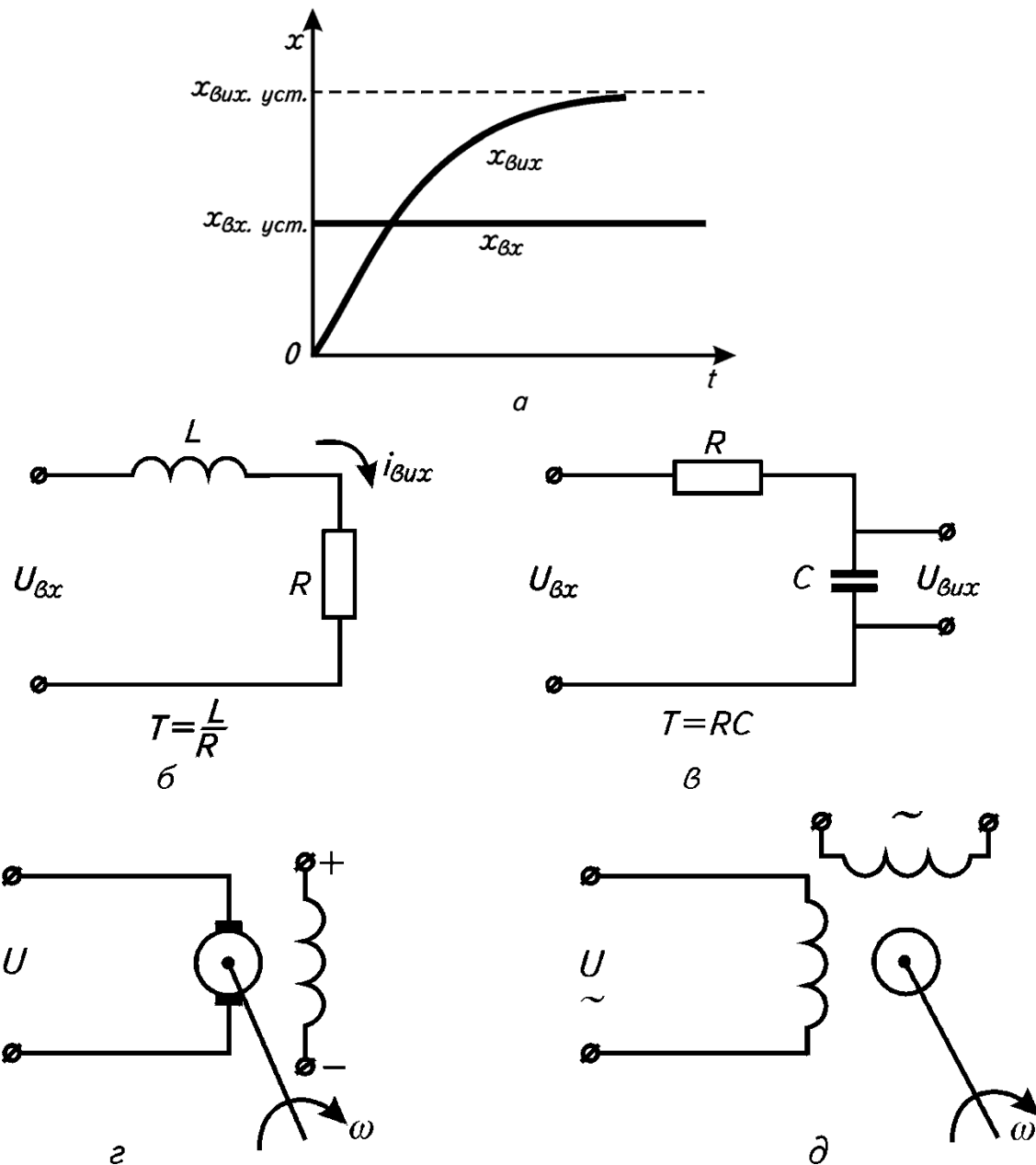


Рисунок 5.1. – Інерційні ланки:  
 а–крива розгону; б,в–електричні ланцюги LC та RC;  
 г–двигун постійного струму з незалежним збудженням;  
 д–двофазний індукційний двигун[5].

**Підсилювальна ланка.** Рівняння динаміки підсилювальної ланки має вигляд

$$x_{vux} = kx_{вх}. \quad (5.7)$$

Передавальна функція ланки дорівнює

$$W(p) = k. \quad (5.8)$$

Із поданням на вхід підсилювальної ланки стрибкоподібного сигналу вихідна величина без запізнення повторює зміну вхідної величини (рис. 5.2, а), тому такі ланки будемо називати *безінерційними*.

Прикладами підсилювальних ланок можуть бути (рис. 5.2, б–д) редуктор, подільник напруги, важільна передача, електронний підсилювач тощо.

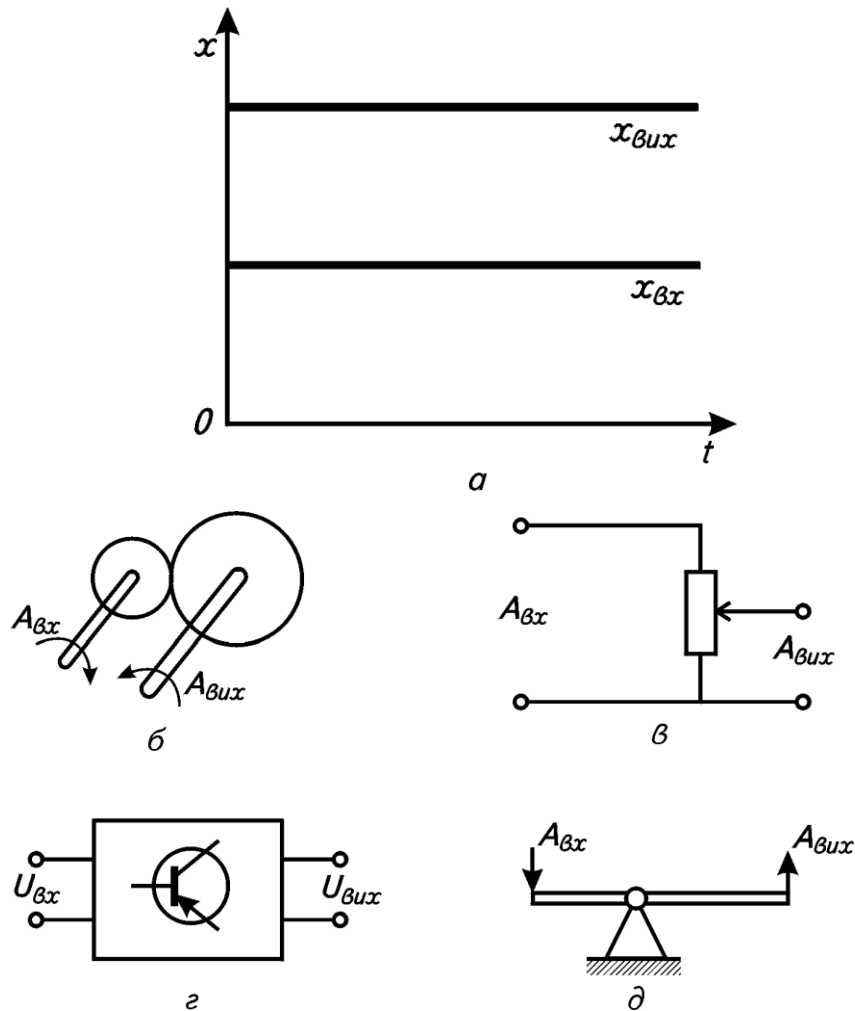


Рисунок 5.2..– *Безінерційні ланки:*  
 а – крива розгону; б – редуктор; в – подільник напруги;  
 г – електронний підсилювач; д – важільна передача[5].

*Астатична ланка першого порядку (інтегрувальна).*

Диференційне рівняння динаміки цієї ланки має вигляд

$$x_{вих} = k \int x_{вх} dt \quad (5.9)$$

або

$$dx_{вих}/dt = kx_{вх}.$$

Передавальна функція інтегрувальної ланки дорівнює

$$W(p) = k/p. \quad (5.10)$$

Перехідною характеристикою інтегрувальної ланки є пряма, яка проходить через початок координат під кутом  $\alpha$  до осі часу (рис. 5.3а).

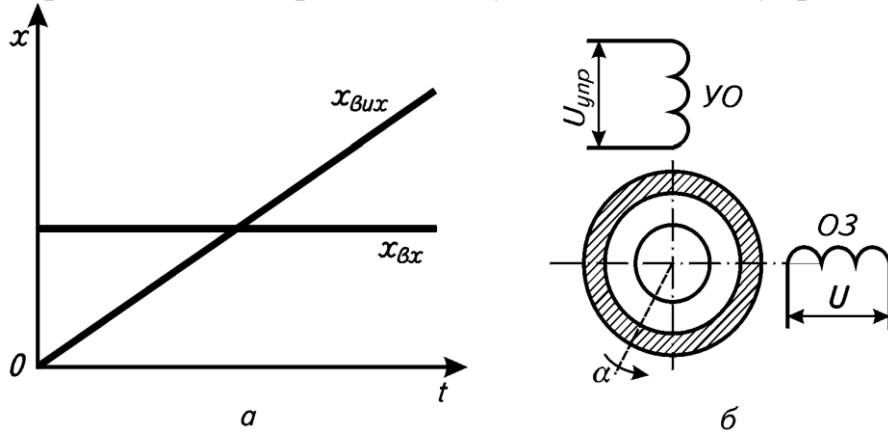


Рисунок 5.3. – Інтегрувальні ланки: а – крива розгону; б– електродвигун

Прикладом астатичної ланки може бути електродвигун, якщо вхідним сигналом є напруга  $U_{впр}$ , а вихідним – кут  $\alpha$  повороту ротора (рис. 5.3, б).[5]

**Диференціювальна ланка.** Диференціювальною називається ланка, у якій вихідна величина пропорційна швидкості зміни вхідної

$$x_{вих} = kd_{вх}/dt. \quad (5.11)$$

Така ланка називається ідеальною. Відповідно до рівняння (5.11) вихідна величина ідеальної диференціювальної ланки прямує до нескінченності за миттєвої (стрибкоподібної) зміни вхідної. Практично такий перехідний процес не можливий. На практиці використовують реальні диференціювальної ланки, які можна подати послідовно з'єднаними ідеальною диференціювальної та анерійдною ланками. Рівняння реальної диференціювальної ланки має вигляд

$$Tdx_{вих}/dt + x_{вих} = kdx_{вх} = kdx_{вх}/dt. \quad (5.12)$$

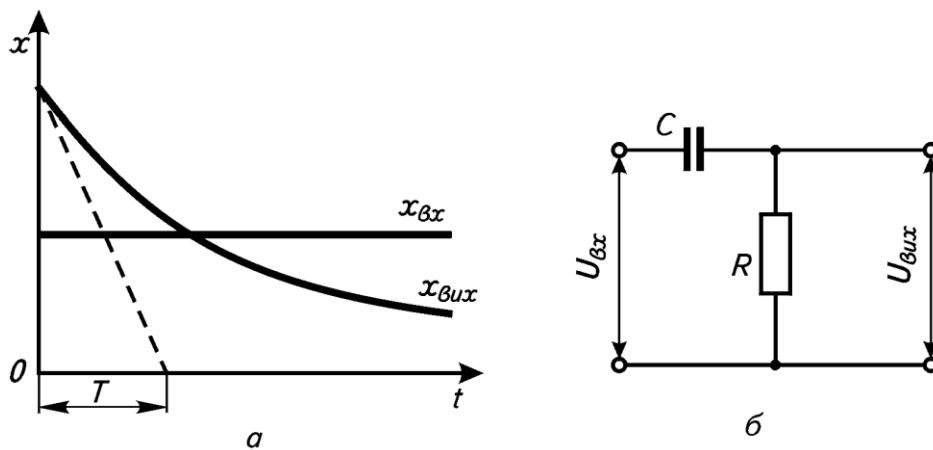


Рисунок 5.4—Реальна диференціувальна ланка:  
 а – крива розгону; б – контур [5].

Передавальна функція ланки визначається таким чином:

$$W(p) = kp / (1 + Tp) \quad (5.13)$$

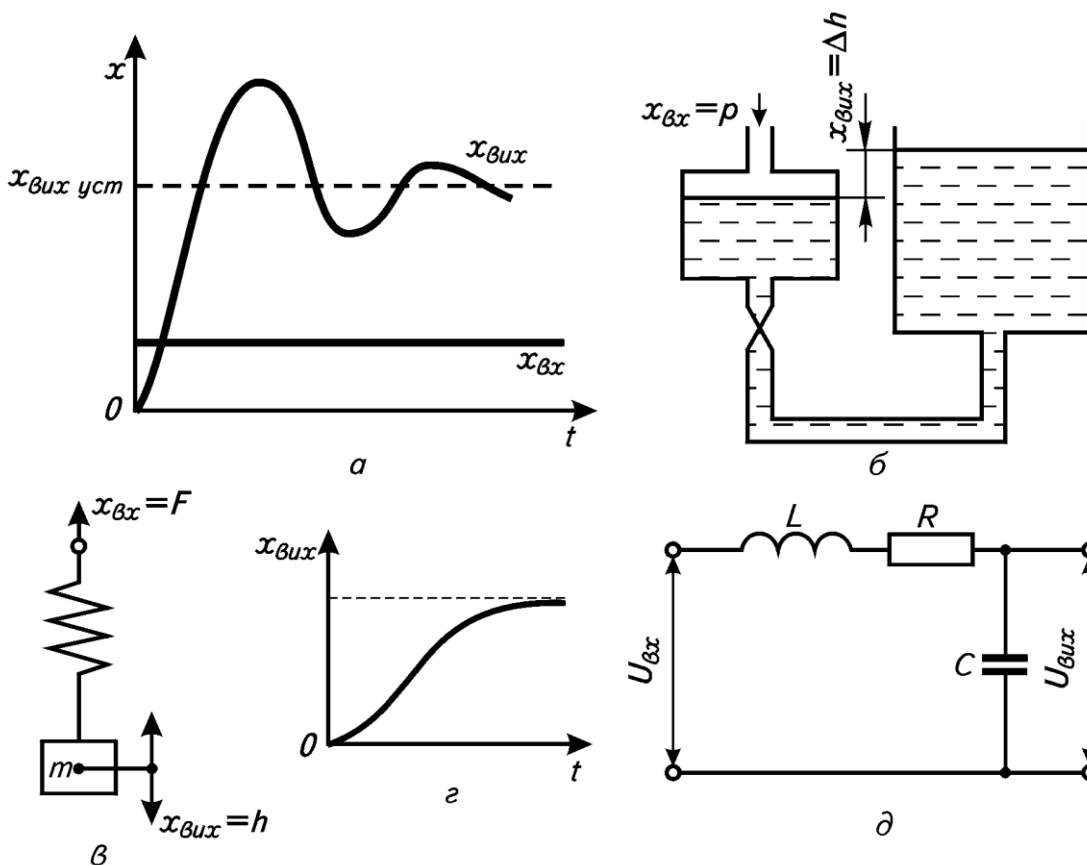


Рисунок 5.5. – Коливальна ланка:  
 а – крива розгону за умов  $T_1 < 2T_2$ ; б – сполучені посудини;  
 в – вантаж із масою  $m$ , підвішений на пружині;  
 г – крива розгону за умов  $T_1 > 2T_2$ ; д – контур  $RLC$  [5].

Перехідна характеристика реальної диференціовальної ланки (рис. 5.4, а) визначається виразом

$$x_{\text{вих}} = (kx_{\text{вх}}/T)e^{-t/T}. \quad (5.14)$$

Прикладом реальної диференціовальної ланки може бути контур, який складається з послідовно включених конденсатора  $C$  та опору  $R$  (рис. 5.4, б).

**Коливальна ланка.** Динамічні властивості цієї ланки описуються рівнянням [5]

$$T_2^2 d^2 x_{\text{вих}}/dt^2 + T_1 dx_{\text{вих}}/dt + x_{\text{вих}} = kx_{\text{вх}}. \quad (5.15)$$

де  $T_1, T_2$  – сталі часу;  $k$  – коефіцієнт підсилення.

В операторній формі рівняння (5.15) має вигляд

$$T_2 p^2 x_{\text{вих}} + T_1 p x_{\text{вих}} + x_{\text{вих}} = kx_{\text{вх}} \quad (5.16)$$

Передавальна функція коливальної ланки визначається як

$$W(p) = k / (T^2 p^2 + T_1 p + 1). \quad (5.17)$$

До коливальної ланки належать пристрої, у яких вихідна величина після подавання на вхід стрибкоподібного збурення прямує до усталеного значення, здійснюючи коливання. Ця ланка складається ніби з двох елементів, що можуть акумулювати енергію або речовину та обмінюватись нею між собою.

Якщо  $T_1 < 2T_2$ , то перехідний процес матиме вигляд згасаючих коливань. За умов  $T_1 > 2T_2$  перехідний процес не буде коливальним, у цьому випадку ланка називатиметься аперіодичною другого порядку (рис. 5.5, а, з).

Прикладами коливальних ланок можуть бути (рис. 5.5, б, в, д); сполучені посудини; вантаж із масою  $m$ , підвішений на пружині; електричний контур RLC. [5]

**Ланка чистого запізнення.** Вихідна величина ланки повторює зміну вхідної величини, але з деяким постійним запізненням (рис. 5.6, а). Рівняння ланки має вигляд:

$$x_{\text{вих}}(t) = x_{\text{вх}}(t - \tau), \quad (5.18)$$

де  $t$  та  $(t-\tau)$  – не множники, а символи;  $\tau$  – чисте запізнення.

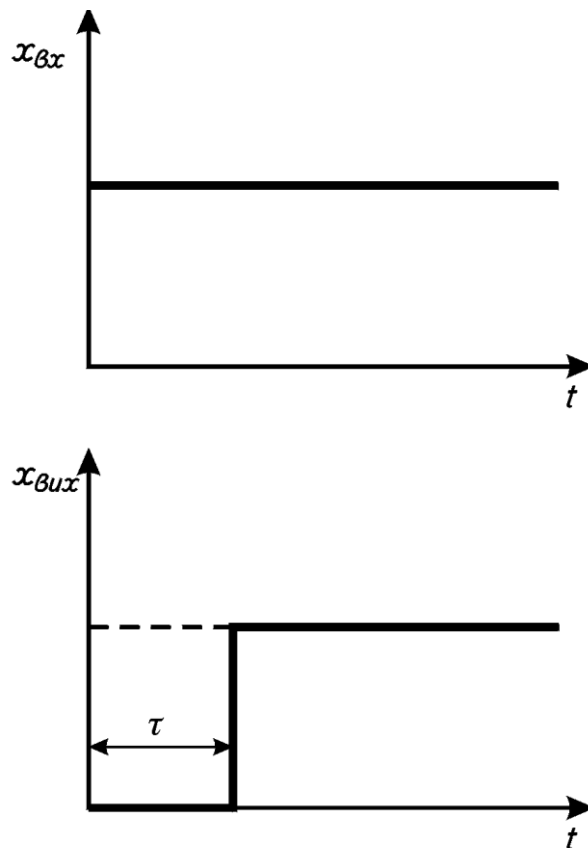


Рисунок 5.6 – Ланка чистого запізнення[5].

Передавальна функція ланки дорівнює

$$W(p)=e^{-p\tau}. \quad (5.19)$$

Прикладами ланок чистого запізнення можуть бути трубопровід, транспортер та ін.[5].

### 5.3. З'єднання ланок та алгоритмічні структурні схеми автоматичних систем

За допомогою типових динамічних ланок можна ідентифікувати не тільки окремі елементи системи, але й систему в цілому. Блок-схема системи, яка складається з окремих типових ланок, називається алгоритмічною структурною схемою і становить динамічну модель системи.

Основою алгоритмічної схеми АСР є функціональна блок-схема автоматичної системи, але в прямокутниках замість функціональної ознаки елементів записуються їхні передавальні функції. Елементи порівняння на алгоритмічній схемі зображуються так само, як і на функціональній.[5]

За алгоритмічною структурною схемою можна визначити передавальну функцію всієї системи та рівняння динаміки. Для цього треба знати правила перетворення структурних схем.

За умов послідовного з'єднання елементів

$$W(p) = W_1(p)W_2(p) \dots W_n(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p). \quad (5.20)$$

де  $W(p)$  результуюча передавальна функція;  $W_1(p) W_2(p) \dots, W_n(p)$  – передавальні функції елементів;  $\prod$  – знак добутку.

За умов паралельного з'єднання елементів

$$W(p) = W_1(p) + W_2(p) + \dots + W_n(p) = \sum_{i=1}^n W_i(p) \quad (5.21)$$

Під час замикання елементів зворотним зв'язком

$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 \pm W_1(p)W_0(p)}, \quad (5.22)$$

де  $W_1(p)$  і  $W_0(p)$  – відповідно передавальні функції з'єднання, що охоплюється зворотним зв'язком, і кола зворотного зв'язку. Якщо зворотний зв'язок від'ємний, ставлять знак «плюс», додатний – «мінус».

Використовуючи залежності (5.20) – (5.22) можна АСР будь-якої структурної складності звести до узагальненого елемента розімкненої системи  $W_p(p)$ , охопленого зовнішнім зворотним зв'язком, який з'єднує вихід системи зі входом. Передавальна функція замкненої системи  $W_s(p)$  за залежністю (5.22) має вигляд

$$W_s(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)W_0(p)} \quad (5.23)$$

Розглянемо алгоритмічну структурну схему складної системи (рис. 5.7), спочатку визначимо передавальну функцію групи паралельно з'єднаних елементів за формулою

$$W_{1-3}(p) = W_1(p) + W_2(p) + W_3(p). \quad (5.24)$$

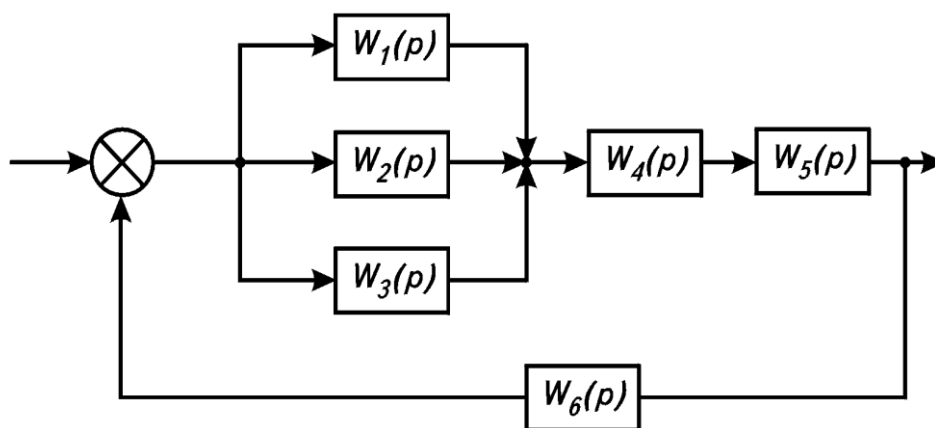


Рисунок 5.7. – Алгоритмічна структурна схема складної системи[5].  
Потім визначимо передавальну функцію послідовно з'єднаних елементів



$$W_{1-5}(p) = W_{1-3}(p)W_4(p)W_5(p) \quad (5.25)$$

Загальна передавальна функція системи дорівнює

$$W_B(p) = \frac{W_{1-5}(p)}{1 + W_{1-5}(p)W_6(p)} \quad (5.26)$$

#### 5.4. Стійкість динамічних систем

Стійкістю називається властивість динамічної системи вертатись до стійкого стану після припинення дії збурення, яке вивело її із цього стану.

Оскільки мова іде, в основному, про замкнені динамічні системи, то слід спочатку звернути увагу на факт, що замкнена система, що складена із стійких динамічних ланок, може в загальному випадку стати нестійкою. Тому особливу важливість при дослідженні динамічних систем представляють дослідження їх стійкості. Стійкість лінійної динамічної системи звичайно полягає в тому, що при дії на неї будь-якого обмеження за абсолютною величиною впливу, змінні, що характеризують систему, змінюються також в обмежених величинах.

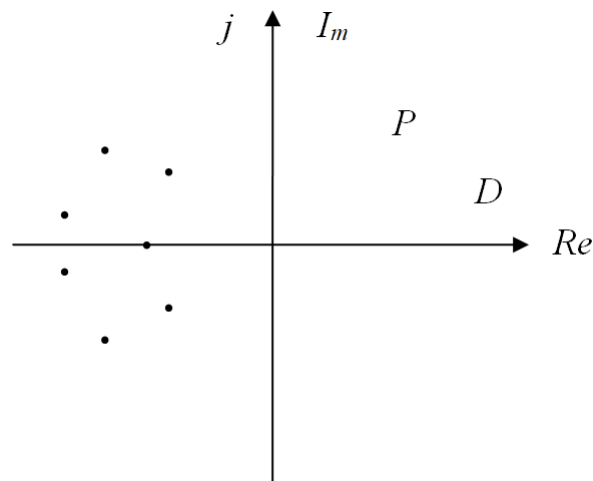
Якщо динамічна система описана диференціальним рівнянням виду:

$$D(p)x = M(p)f(t), \quad (5.27)$$

тоді для знаходження вільних коливань системи складають характеристичне рівняння системи. Змінюючи в операторі  $D(p)$  символ диференціювання змінної  $\lambda$  на  $p$  і, прирівнюючи одержаний поліном до 0, одержимо:

$$D(p) = a_0p^n + a_1p^{n-1} + \dots + a_{n-1}p + a_n = 0. \quad (5.28)$$

При цьому вільні коливання затухають впродовж часу лише в тому випадку, якщо усі корені характеристичного рівняння мають від'ємні дійсні частини. Таким чином, необхідною і достатньою умовою стійкості є від'ємність дійсних частин усіх коренів характеристичного рівняння в лівій частині комплексної площини  $p$ . цей приклад стійкості системи наведено на рис. 5.8.



**Рисунок 5.8** – Розташування коренів характеристичного рівняння стійкої системи на площині  $P$ :  $Im$  – уявна величина;  $Re$  – дійсна величина

Будемо вважати, що деяка динамічна система стійка і усі корені характеристичного рівняння знаходяться в лівій частині комплексної площини. Розташування коренів на площині  $p$  пов'язана зі значенням параметрів, тому при їх змінні змінюються коефіцієнти диференційного рівняння системи і, відповідно, змінюються, рухаються на комплексній площині корені характеристичного рівняння.

У результаті зміни параметрів може виникнути таке положення, коли при своєму русі хоч би один із дійсних коренів або пара комплексних спряжених коренів попадає на уявну (мінливу) частину осі, а усі інші корені будуть заходитись ліворуч осі. Відповідно цьому положенню коренів співвідношення між параметрами системи визначає межу стійкості. Якщо усі можливі значення параметрів системи розташовані в деякій області, то межа стійкості розділяє область параметрів на дві області: зону стійкості та зону нестійкості.

На перший погляд може датися, що питання дослідження стійкості динамічної системи дуже просте: достатньо обчислити корені та, змінюючи параметри системи, досягти від'ємності дійсних частин коренів характеристичного рівняння. Утім задача ускладнюється тим, що розрахунок коренів, тобто обчислення характеристичного рівняння у загальному вигляді, можливо лише для другого або третього порядку. Алгебраїчні рівняння ступені четвертого, п'ятого порядку в загальному вигляді без використання ЕОМ не розв'язуються. Тому ще в ХХ столітті вченими були розроблені спеціальні правила, які дозволяють без обчислення коренів визначати стійкість системи. Ці правила одержали назву критеріїв стійкості. Проблема стійкості хвилювала вчених починаючи з ХІХ століття. Вперше поняття стійкості динамічних систем були досліджені Максвеллом і Вишнеградським [3,5, 9,14 ].

У кінці ХІХ століття А. Гурвіцем і Е. Дж. Раус незалежно один від одного опублікували наукові роботи, присвячені методу аналізу стійкості лінійних систем. Розглянемо критерії Рауса-Гурвіца детальніше.

## 5.5. Критерій стійкості

Критерій Рауса-Гурвіца (розроблений Раусом та доповнений Гурвіцем) призначено для аналізу стійкості динамічних систем. З метою використання цього критерію із коефіцієнтів характеристичного рівняння (5.28) складають таблицю:

$$\begin{array}{cccc|cccc}
 a_1 & a_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \\
 a_3 & a_2 & a_1 & a_0 & 0 & 0 & \dots & \\
 a_5 & a_4 & a_3 & a_2 & a_1 & a_0 & \dots & \\
 a_7 & a_6 & a_5 & a_4 & a_3 & a_2 & \dots & \\
 a_9 & a_8 & a_7 & a_6 & a_5 & a_4 & \dots & \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots
 \end{array} \tag{5.29}$$

По діагоналі таблиці записують усі коефіцієнти рівняння, починаючи з  $a_1$ , а ліворуч від діагоналі – рядки таблиці заповнюють коефіцієнтами у порядку збільшення номерів, а праворуч – у порядку їх зменшення. Місце коефіцієнтів з індексами більше ступеня рівняння  $n$  заповнюють нулями.

Визначники, одержані з цієї таблиці підкреслюванням рядків і стовпчиків, називають визначниками Гурвіца:

$$\Delta_1 = a_1; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 \\ a_3 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3; \tag{5.30}$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 \\ a_5 & a_4 & a_3 \end{vmatrix} = a_1 a_2 a_3 + a_0 a_1 a_5 - a_0 a_3^2 - a_4 a_1^2; \tag{5.31}$$

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 & 0 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 & a_0 \\ a_5 & a_4 & a_3 & a_2 \\ a_7 & a_6 & a_5 & a_4 \end{vmatrix} = \dots \text{ і т. д.} \tag{5.32}$$

Для стійкості системи необхідно і достатньо, щоб коефіцієнти  $a_0$  і визначника Гурвіца  $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots, \Delta_n$  були позитивними.

Якщо використовувати критерій Рауса-Гурвіца до систем другого, третього і четвертого порядків, то неважко показати, що умови стійкості для цих систем мають наступний вигляд:

системи другого порядку ( $n = 2$ ):

$$a_0 > 0, a_1 > 0, a_2 > 0;$$

системи третього порядку ( $n = 3$ ):

$$a_0 > 0, a_1 > 0, a_2 > 0, a_3 > 0,$$

$$a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0;$$

системи четвертого порядку ( $n = 4$ ):

$$a_0 > 0, a_1 > 0, a_2 > 0, a_3 > 0, a_4 > 0,$$

$$a_1 a_2 a_3 - a_0 a_3^2 - a_1^2 a_4 > 0.$$

Виходячи із цього, виведемо наслідок критерію Рауса-Гурвіца, відповідно до якого для стійкості систем не вище четвертого порядку необхідно, щоб усі коефіцієнти характеристичного рівняння і один визначник були позитивними  $\Delta_{n-1}$ .

Критерій Рауса-Гурвіца можна використовувати у формі алгоритму Рауса, який складається з коефіцієнтів характеристичного рівняння  $D(\lambda) = 0$  і має вигляд:

$$\begin{array}{l} \left\| \begin{array}{ccc} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \end{array} \right\| \dots \\ \left\| \begin{array}{ccc} b_0 & b_2 & b_4 \\ a_1 & a_3 & a_5 \end{array} \right\| \dots \\ \left\| \begin{array}{cccc} b_1 & b_3 & b_5 & \dots \\ b_0 & b_2 & b_4 & \dots \end{array} \right\| \end{array} \quad (5.33)$$

$$\left\| \begin{array}{cccc} c_0 & c_2 & c_4 & \dots \\ b_1 & b_3 & b_5 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{array} \right\|,$$

$$\text{де } b_0 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix}; b_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_5 \\ a_0 & a_4 \end{vmatrix}; b_4 = \begin{vmatrix} a_1 & a_2 \\ a_0 & a_6 \end{vmatrix};$$

$$b_1 = \begin{vmatrix} b_0 & b_2 \\ a_1 & a_3 \end{vmatrix}; b_3 = \begin{vmatrix} b_0 & b_4 \\ a_1 & a_5 \end{vmatrix}; b_5 = \begin{vmatrix} b_0 & b_6 \\ a_1 & a_7 \end{vmatrix}.$$

Таким чином, мінори кожної попередньої матриці, які включають перший стовпець, утворюють послідовність шуканих коефіцієнтів верхнього рядка наступної матриці.

Умовою стійкості є позитивність елементів перших стовпців усіх матриць:  $a_0 > 0$ ;  $a_1 > 0$ ;  $b_0 > 0$ ;  $b_1 > 0$ ;  $c > 0$ .

Критерій Михайлова. Якщо в характеристичне рівняння (5.28) підставити  $p = j\omega$ , одержимо вектор:

$$D(j\omega) = a_0(j\omega)^n + a_1(j\omega)^{n-1} + \dots + a_{n-1}(j\omega) + a_n, \quad (5.34)$$

який при зміні частоти  $\omega$  змінює свої модуль і фазу. Криву, що описує на комплексній площині кінцем вектора  $D(j\omega)$  при зміні  $\omega$  від нуля до безкінечності, будемо називати характеристичною кривою або годографом вектора  $D(j\omega)$  (годограф Михайлова).

Якщо характеристична крива при змінненні  $\omega$  від нуля до нескінченності обходить, починаючи з позитивної дійсної осі, послідовно (тобто проти годинникової стрілки)  $n$  квадратів, то динамічна система стійка;  $n$  – ступінь рівняння  $D(\lambda) = 0$ .

Доведення цього правила ви знайдете в [3,12,14,15,17,65 ] на основі відомого в теорії функцій комплексної змінної принципу аргументу.

Характеристичні криві для стійких систем 1-5-го порядку наведені на рис. 5.9, а для нестійкої системи – на рис. 5.10.

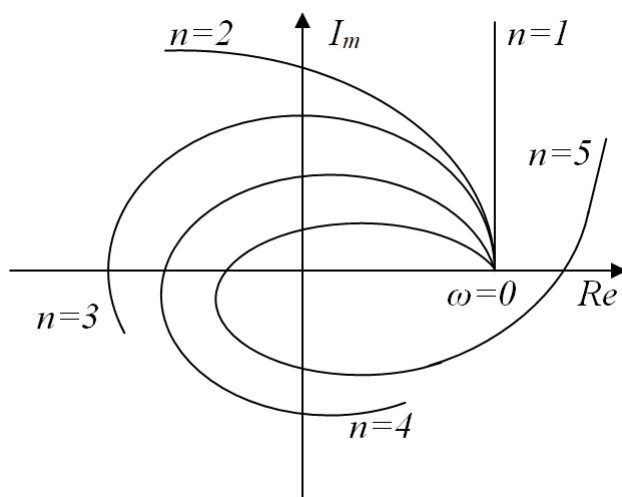


Рисунок 5.9. – Характеристична крива (годограф Михайлова) стійких систем 1-5-го порядку

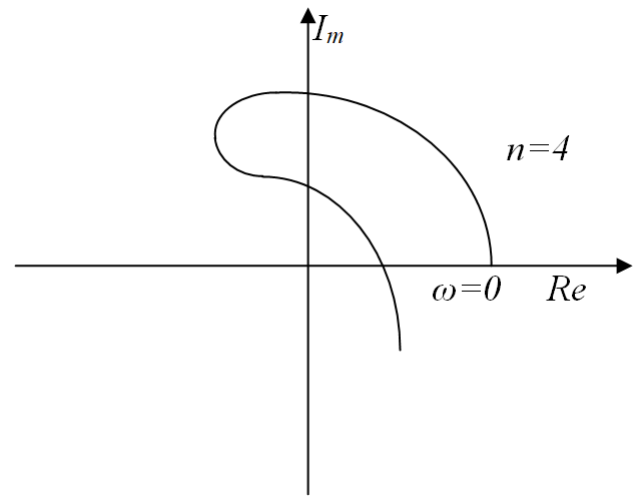


Рисунок 5.10.– Характеристичні криві нестійкої системи 4-го порядку

Використання на практиці цього критерію дуже поширене, оскільки комп'ютер дає уявлення про стійкість системи в графічному вигляді.

Отже, критерій Михайлова можна сформулювати так: щоб система автоматичного керування була стійкою, необхідно і достатньо, щоб за зміни частоти  $\omega$  від 0 до  $\infty$  вектор Михайлова повертався б на кут  $n \frac{\pi}{2}$ , де  $n$  – порядок системи (ступінь її характеристичного полінома).

Таким чином, комп'ютер наносить на графіку годограф Михайлова, а ви визначаєте чи в натуральній (спочатку перший, потім другий і так аж до  $n$ -го) послідовності годограф обходить усі належні квадранти комплексної площини [3,9,14].

Критерій Найквіста. Цей критерій відрізняється від критерію Михайлова тим, що може бути використаним для судження про стійкість динамічної системи не лише за розрахунковими, але й за експериментальними даними. Критерій Г. Найквіста (частотний критерій стійкості) був запропонований ним в 1932 році і до сьогодні залишається фундаментальним методом аналізу

стійкості лінійних систем керування. Критерій Найквіста оснований на відомій в теорії функцій комплексного-змінного теоремі Коші. Ця теорема має безпосереднє відношення до відображення контурів на  $p$  – площині і за допомогою якої легко можна дати геометричну інтерпретацію САР. Критерій Найквіста дає змогу досліджувати стійкість САР як із зосередженими, так і з розподіленими параметрами.

Демо визначення критерію: Якщо систему, яка в розімкненому стані є стійкою або нейтральною (на межі стійкості), замкнути, то після замикання вона залишається стійкою за умови, що годограф амплітудно-фазової характеристики розімкненої системи зі зміною частоти  $\omega$  від 0 до  $\infty$  не охоплюватиме точки  $(-1+j(0))$ . Охоплюваною вважається область праворуч від спостерігача, що рухається вздовж годографа  $W_{\text{рез}}(j\omega)$  у бік збільшення частоти  $\omega$  [3,12,14,15]. Критерій стійкості Найквіста є універсальним, тому що його можливо використати для будь-якого порядку системи. Якщо відома амплітудно-фазова характеристика розімкненої системи:

$$W(j\omega) = \frac{M_p(j\omega)}{D_p(j\omega)}, \quad (5.35)$$

де  $M_p(p)$ ,  $D_p(p)$  – оператори диференціального рівняння розімкненої системи, то можна визначити амплітудно-фазову характеристику замкненої системи.

Розглянемо вираз:

$$\Phi(j\omega) = \frac{W(j\omega)}{1+W(j\omega)} = \frac{M_p(j\omega)}{M_p(j\omega)+D_p(j\omega)} = \frac{M_p(j\omega)}{D(j\omega)}, \quad (5.36)$$

де  $D(j\omega)$  – характеристична крива замкненої системи:

$$D(j\omega) = D_p(j\omega) + M_p(j\omega), \quad (5.37)$$

де  $D_p(j\omega)$  – характеристична крива розімкненої системи, ці криві мають один і той же порядок  $n$ .

Розглянемо функцію  $\gamma(j\omega)$ , що визначається виразом:

$$\gamma(j\omega) = \frac{W(j\omega)}{\Phi(j\omega)} = 1 + W(j\omega) = \frac{D(j\omega)}{D_p(j\omega)}. \quad (5.38)$$

Відповідно критерію Михайлова замкнена система буде стійкою за умови, що вектор  $D(j\omega)$  обертається на кут  $n \frac{\pi}{2}$  при зміні частоти  $\omega$  від нуля до нескінченості. Якщо розімкнена система стійка, то і вектор  $D_p(j\omega)$  повернеться теж на кут  $n \frac{\pi}{2}$ . При цьому кут повернення вектора  $\gamma(j\omega)$ , рівний різниці кутів повернення векторів  $D(j\omega)$  та  $D_p(j\omega)$ , буде дорівнювати нулю.

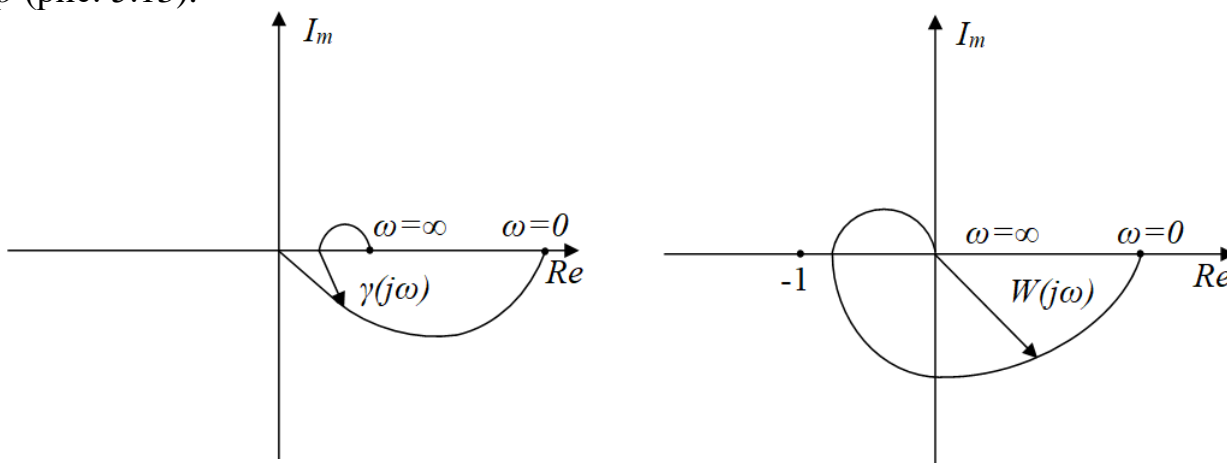
Таким чином, зробимо наступний висновок: система стійка, коли годограф вектора  $\gamma(j\omega) = 1 + W(j\omega)$ , не охоплює початок координат. Так як перехід від вектора  $\gamma(j\omega)$  до вектора  $W(j\omega)$  можливо виконати зміщенням початку координат праворуч на одиницю (рис. 5.11), то формулювання критерію для випадку, коли розімкнена система стійка, виглядає дуже просто. Якщо розімкнена система стійка і амплітудно-фазова характеристика розімкненої системи  $W(j\omega)$  не охоплює точку  $(-1, j(0))$ , тоді замкнена система також стійка.

Якщо ж розімкнена система нестійка, тобто має  $m$  коренів рівняння  $D_p(\lambda) = 0$  в правій частині комплексної площини  $\lambda$ , тоді замкнена система стійка лише у тому випадку, коли АФХ розімкненої системи  $W(j\omega)$  охоплює точку  $(-1, j(0))$  у позитивному напрямку  $\frac{m}{2}$  разів.

У тих випадках, коли АФХ є складною кривою, декілька разів перетинає дійсну вісь (рис. 5.12), будемо рахувати не число обертів вектора  $W(j\omega)$  навколо точки  $(-1, j(0))$ , а число позитивних (знизу-вгору) переходів АФХ через відрізок дійсної осі  $(-\infty, -1)$ . Тоді замкнена система буде стійкою лише в тому випадку, коли різниця цих чисел дорівнюватиме половині числа коренів  $m$  характеристичного рівняння  $D_p(\lambda) = 0$ , які знаходяться в правій комплексній площині  $\lambda$ . Якщо  $W(j\omega)$  за  $\omega = 0$  розпочинається на відрізку  $(-\infty, -1)$ , то будемо вважати, що  $W(j\omega)$  при  $\omega = 0$  завершує половину переходу. Інколи з метою скорочення обчислень одержують зворотну амплітудно-фазову характеристику виду:

$$W^{-1}(j\omega) = \frac{1}{W(j\omega)} = \frac{D_p(j\omega)}{M_p(j\omega)}. \quad (5.39)$$

Динамічна система стійка, якщо різниця між числами від'ємних і позитивних переходів зворотної амплітудно-фазової характеристики  $W^{-1}(j\omega)$  через відрізок дійсної осі  $(0, -1)$  дорівнює  $\frac{m}{2}$ , де  $m$  – число коренів характеристичного рівняння  $D_p(p) = 0$  в правій частині комплексної площини  $p$  (рис. 5.13).



а) б)  
Рисунок 5.11. – Годографи векторів: а)  $\gamma(j\omega)$  і б)  $W(j\omega)$

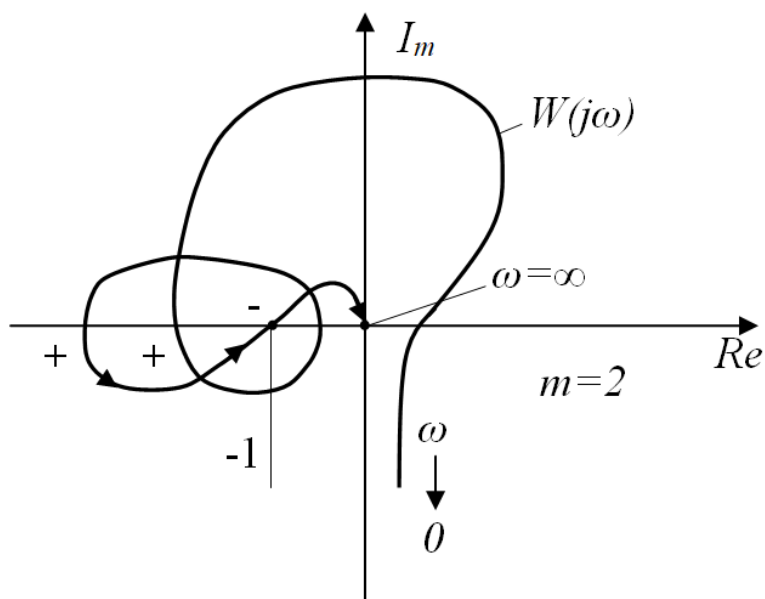


Рисунок 5.12. – Приклад, коли є два кореня з позитивними дійсними частинами ( $m = 2$ ) система стійка (різниця між числом позитивних і від’ємних переходів дорівнює  $\frac{m}{2} = 1$ )

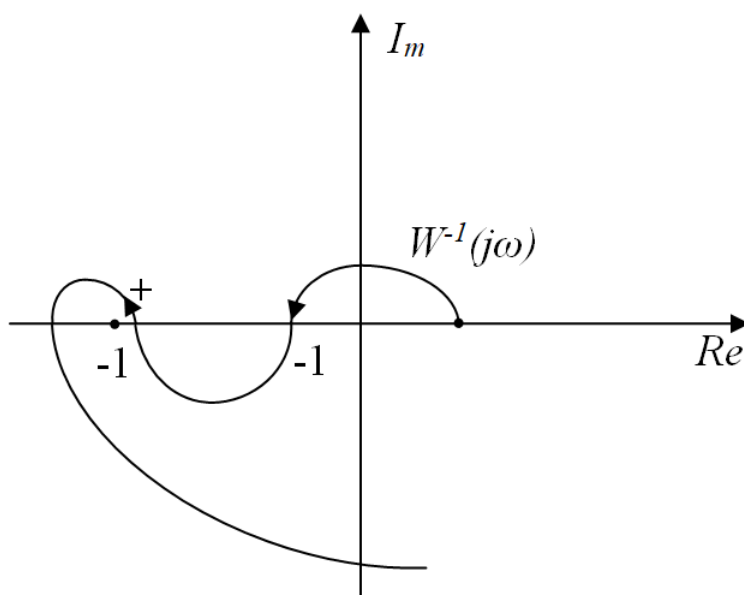


Рисунок 5.13. – Система стійка, якщо усі корені мають від’ємні дійсні частини, тому що різниця переходів дорівнює  $m = 0$

Розглянемо приклади використання критерію Найквіста.

Система з трьома полюсами (коренями). Розглянемо одноконтурну систему керування, представлену на рис. 5.14. Будемо вважати, що:

$$D(p) = \frac{K}{p(\tau_1 p + 1)(\tau_2 p + 1)} \quad (5.40)$$



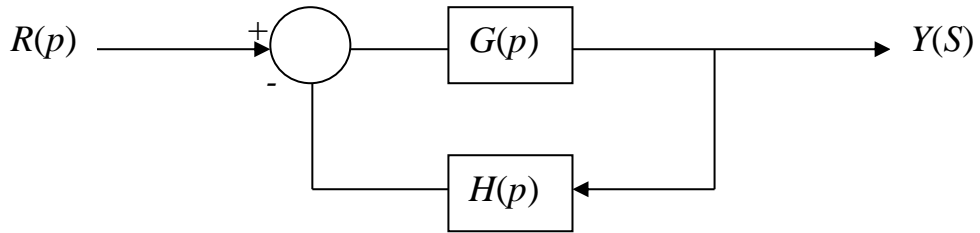


Рисунок 5.14. – Одноконтурна система керування

Будемо вважати, що відображення для  $G(p)$  і  $H(p)$  симетричні відносно дійсної вісі, тому достатньо дослідити годограф  $H(p)$ . Підставимо у рівняння 5.40  $p = j\omega$ , тоді:

$$H(j\omega) = \frac{K}{j\omega(j\omega\tau_1+1)(j\omega\tau_2+1)} = \frac{-K(\tau_1+\tau_2)-jK\left(\frac{1}{\omega}\right)(1-\omega^2\tau_1\tau_2)}{1+\omega^2(\tau_1^2+\tau_2^2)+\omega^4\tau_1^2\tau_2^2} = \quad (5.41)$$

$$= \frac{K}{[\omega^4(\tau_1+\tau_2)^2+\omega^2(1-\omega^2\tau_1\tau_2)^2]^{1/2}} \times e^{-j\left(\frac{\pi}{2}+\arctg\omega\tau_1+\arctg\omega\tau_2\right)}.$$

Якщо  $\omega = 0^+$  [ $H(j\omega)] = \infty$ , то  $\arctg H(j\omega) = -90^\circ$ .

При  $\omega \rightarrow +\infty$  ми маємо:

$$\lim_{\omega \rightarrow +\infty} H(j\omega) = \lim_{\omega \rightarrow +\infty} \frac{1}{\omega^3\tau_1\tau_2} e^{-j\left(\frac{\pi}{2}+\arctg\omega\tau_1+\arctg\omega\tau_2\right)} =$$

$$\left(\lim_{\omega \rightarrow +\infty} \frac{1}{\omega^3\tau_1\tau_2}\right) e^{-j\frac{3\pi}{2}}. \quad (5.42)$$

Таким чином,  $H(j\omega)$  стає рівним 0, коли  $\arctg H(j\omega) = -270^\circ$ . Щоб це виникло, годограф  $H(j\omega)$  повинен перетинати дійсну вісь, як показано на рис. 5.19.

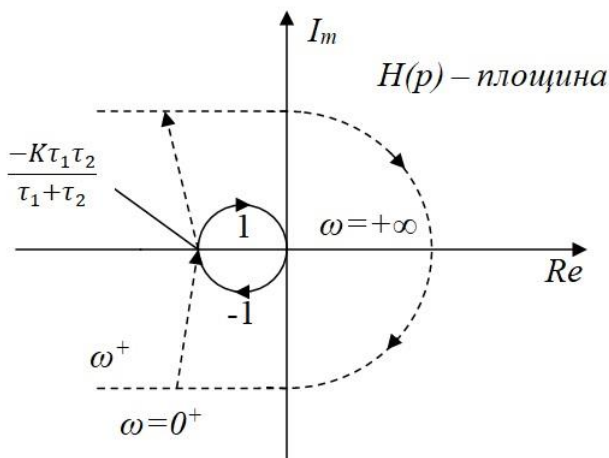


Рисунок 5.15. – Діаграма Найквіста для функції  $H(p) = \frac{K}{p}(\tau_1 p + 1)(\tau_2 p + 1)$ . (Штрихом ліворуч від початку координат відмічено точку -1)

У ситуації, наведеній на рис. 5.15, годограф два рази охоплює точку -1, тобто система є нестійкою, оскільки два корені її характеристичного рівняння знаходяться в правій напівплощині.

Точку, в якій годограф  $H(j\omega)$  перетинає дійсну вісь  $Re$ , можливо знайти, прирівнявши до 0 умовну частину функції  $H(j\omega) = Re + jI_m$ .

Із виразу (5.42) маємо:

$$I_m = \frac{-K\left(\frac{1}{\omega}\right)(1-\omega^2\tau_1\tau_2)}{1+\omega^2(\tau_1^2+\tau_2^2)+\omega^4\tau_1^2\tau_2^2} = 0. \quad (5.43)$$

Таким чином,  $I_m = 0$ , якщо  $1 - \omega^2\tau_1\tau_2 = 0$ , або  $\omega = \frac{1}{\sqrt{\tau_1\tau_2}}$ . На цій частоті дійсна частина  $H(j\omega)$  дорівнює:

$$Re = \frac{-K(\tau_1+\tau_2)}{1+\omega^2(\tau_1^2+\tau_2^2)+\omega^4\tau_1^2\tau_2^2},$$

$$\omega^2 = Re\tau_1\tau_2 = \frac{-K(\tau_1+\tau_2)\tau_1\tau_2}{\tau_1\tau_2+(\tau_1^2+\tau_2^2)+\tau_1\tau_2} = \frac{-K\tau_1\tau_2}{\tau_1+\tau_2}. \quad (5.44)$$

Отже, система буде стійкою, якщо:

$$\frac{-K\tau_1\tau_2}{\tau_1+\tau_2} \geq -1 \quad (5.45)$$

або

$$K \leq \frac{\tau_1+\tau_2}{\tau_1\tau_2}. \quad (5.46)$$

Якщо, наприклад,  $\tau_1 = \tau_2 = 1$ , то  $H(p) = \frac{K}{p(p+1)^2}$  і, використовуючи умову (5.46), знаходимо, що система буде стійкою при  $K \leq 2$ .

Розглянемо приклад системи з нулем в правій половині площини  $p$ . Розглянемо систему, наведену на рис. 5.14, якщо

$$H(p) = \frac{K(p-2)}{(p+1)^2}.$$

Відзначимо, що в розімкненій системі ця система стійка. Після заміни  $p = j\omega$  одержимо:

$$H(j\omega) = \frac{K(j\omega-2)}{(j\omega+1)^2} = \frac{K(j\omega-2)}{(1-\omega^2)+j2\omega}. \quad (5.47)$$

При  $\omega \rightarrow +\infty$  ми маємо:

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} H(j\omega) = \left(\lim_{\omega \rightarrow +\infty} \frac{K}{\omega}\right) e^{-j\frac{\pi}{2}}. \quad (5.48)$$

При  $\omega = \sqrt{5}$   $H(j\omega) = K/2$ , а при  $\omega = 0^+$   $H(j\omega) = -2K$ . Діаграма

Найквіста для  $H(j\omega)/K$  наведена на рис. 5.15. Годограф  $H(j\omega)$  перетинає точку  $(-1, +j0)$  при  $K = 1/2$ .

Отже, система стійка лише в діапазоні  $0 < K \leq 1/2$ . Якщо  $K > 1/2$ , то число охопленнь точки  $-1$ ,  $N = 1$ . Число полюсів  $H(p)$  у правій напівплощині  $p = 0$ . Таким чином, ми маємо  $Z = N + p = 1$ , тобто система стійка. Аналіз діаграми Найквіста, наведений на рис. 5.19 для  $H(j\omega)/K$ , показує, що система буде нестійкою при  $K > 1/2$ .

Перейдемо до вивчення відносної стійкості, пов'язаної з критерієм Найквіста. Критерій Найквіста дозволяє визначити абсолютну стійкість системи, крім цього він також може бути використаний для оцінки відносної стійкості. На рис. 5.16 наведена частотна характеристика, яка відповідає функції

$$H(j\omega) = \frac{K}{j\omega(j\omega\tau_1+1)(j\omega\tau_2+1)}, \quad (5.49)$$

побудована для різних значень  $K$ .

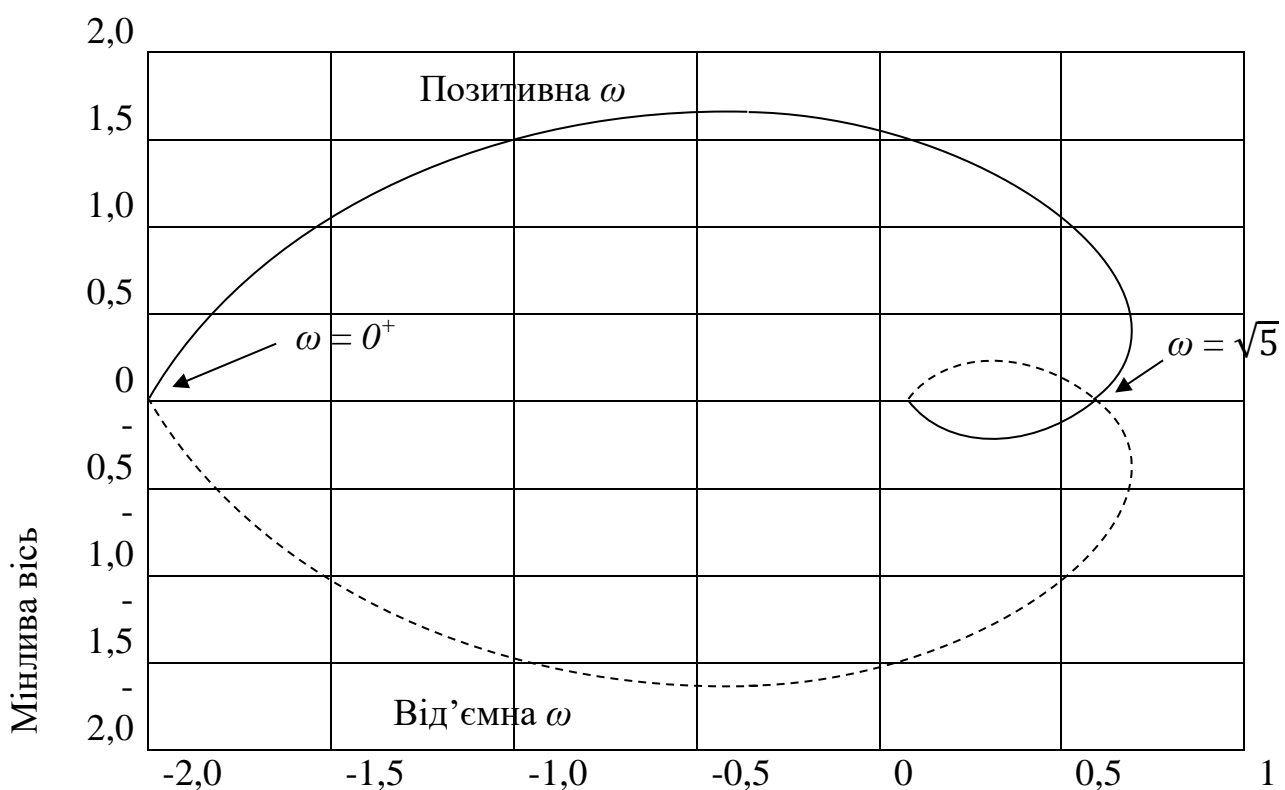


Рисунок 5.16.– Діаграма Найквіста до прикладу для  $H(j\omega)/K$

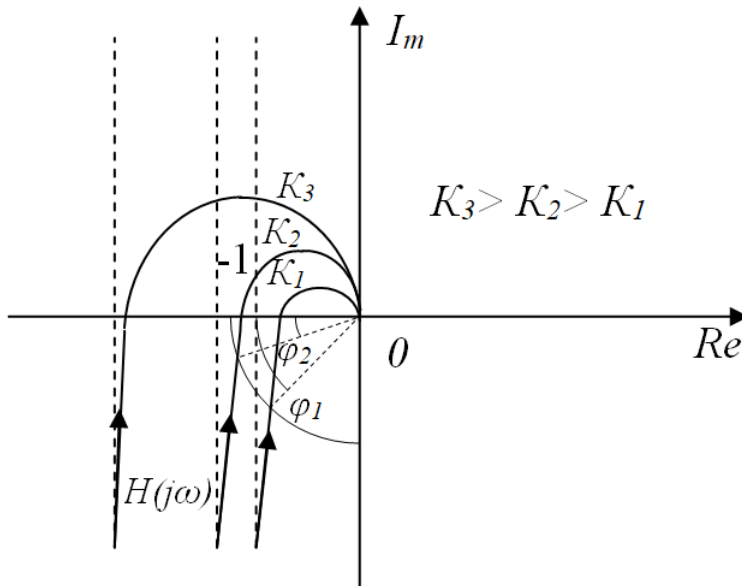


Рисунок 5.17. – Годограф Найквіста  $H(j\omega)$  при трьох значеннях коефіцієнтів підсилення

При збільшенні  $K$  годограф  $H(j\omega)$  наближається до точки  $-1$ , а при  $K = K_3$  охоплює її.

Якщо годограф перетинає дійсну вісь  $Re$  в точці  $Re = \frac{K\tau_1\tau_2}{\tau_1+\tau_2}$ , то два кореня характеристичного рівняння системи будуть знаходитися на мінливій вісі, а, отже

$$Re = 1 \text{ або } K = \frac{\tau_1+\tau_2}{\tau_1\tau_2}.$$

Чим менше  $K$  відносно цього критичного значення, тим більше буде стійкою система, і різниця між  $K = \frac{\tau_1+\tau_2}{\tau_1\tau_2}$ , а отже  $K = K_2$  може слугувати мірою відносної стійкості. Ця міра відносної стійкості називається запасом по модулю і визначається як величина, зворотна модулю  $H(j\omega)$  на частоті, при якій фазовий зсув дорівнює  $-180^\circ$  (тобто  $Re = 0$ ). Запас по модулю показує, на скільки разів можливо було б збільшити коефіцієнт підсилення системи, щоб годограф пройшов через точку  $Re = -1$ .

Оскільки фазовий зсув дорівнює  $-180^\circ$  при частоті  $\omega = \frac{1}{\sqrt{\tau_1\tau_2}}$ , то запас по модулю визначається виразом:

$$\left| \frac{1}{H(j\omega)} \right|_{\omega=\frac{1}{\sqrt{\tau_1\tau_2}}} = \left[ \frac{K_2\tau_1\tau_2}{\tau_1+\tau_2} \right]^{-1} = \frac{1}{d}. \quad (5.50)$$

Запас по модулю можна також вимірювати в децибелах:

$$20 \lg \left( \frac{1}{d} \right) = -20 \lg d, \text{ ДБ} \quad (5.51)$$

Наприклад, якщо  $\tau_1 = \tau_2 = 1$ , то система стійка при  $K \leq 2$ .

Нехай  $K = K_2 = 0,5$ , ми одержимо запас стійкості:

$$\frac{1}{d} = \frac{K_2 \tau_1 \tau_2}{\tau_1 + \tau_2} = 4 \text{ або } 20 \lg 4 = 12 \text{ ДБ.} \quad (5.52)$$

Таким чином, запас по модулю показує, що коефіцієнт підсилення системи можливо збільшити в 4 рази (або на 12 ДБ), коли вона може стати на межі стійкості.

Запас по модулю – величина, що визначена при фазовому зсуві  $-180^\circ$  і яка показує на скільки разів може бути збільшено коефіцієнт підсилення системи, спершу ніж вона опиниться на межі стійкості, тобто діаграма Найквіста пройде через точку  $(-1, +j0)$ .

Іншим показником відносної стійкості слугує параметр – запас по фазі. Він показує, на який кут повинен бути повернутий годограф  $H(j\omega)$ , щоб при частоті  $\omega$ , на якій  $|H(j\omega)| = 1$ , він повинен пройти через точку  $(-1, +j0)$ . Ця міра відносної стійкості еквівалента додатковому запізненню по фазі, при якому система стає на межі стійкості. Запас по фазі легко визначити за діаграмою Найквіста (рис. 5.17). Коли коефіцієнти  $K = K_2$  – це величина  $\varphi_2$ , при  $K = K_1$  – це  $\varphi_1$ , тобто такі додаткові фазові зсуви, при яких система стає на межі стійкості.

Отже, запас по фазі – величина, яка визначається на частоті, за якої  $H(j\omega) = 1$  і що показує, який додатковий від'ємний фазовий зсув, допустимий в системі, раніш ніж вона буде знаходитись на межі стійкості, тобто діаграма Найквіста пройде через точку  $(-1, +j0)$ .

### **5.6. Автоматичні регулятори в системах керування виробництвом продуктів харчування**

Автоматичний регулятор (АР) – це керувальний пристрій, який має забезпечувати необхідну якість регулювання. Регулятори підбираються з урахуванням властивостей об'єктів регулювання. [3,5]

Найбільш важливою характеристикою регулятора є *закон регулювання*.

За характером регульованої дії розділяють регулятори безперервної та дискретної дії. У регуляторів безперервної дії (аналогових) регулююча дія здійснюється безперервно за відповідної зміни відхилення регульованого параметра. Регулятори дискретної дії змінюють регулюючу дію тільки з досягненням регульованим параметром певних заданих значень.

Розглянемо структурну схему автоматичного регулятора (рис. 5.18). На елемент порівняння (ЕП) надходять сигнали заданого  $x_{ex}$  та дійсного  $x_{вих}$  значень регульованої змінної (тобто сигнали від задавача та вимірювального елемента). Сигнал відхилення (розузгодження)  $\Delta x = x_{ex} - x_{вих}$  передається на блок, який містить підсилювач сигналу ПС, вузол управління (ВУ), за допомогою якого формується управляючий сигнал згідно з законом регулювання, та ланцюг від'ємного зворотного зв'язку (ЛЗЗ). ЛЗЗ може бути підсилювачем або більш складним елементом.

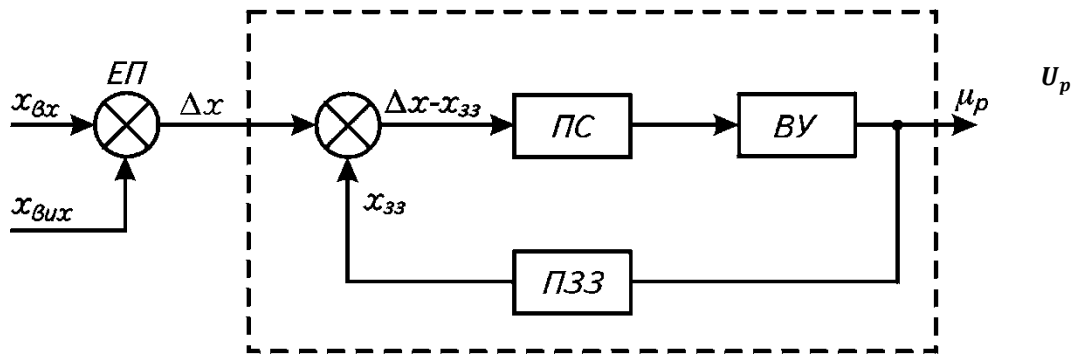


Рисунок 5.18. – Структурна схема автоматичного регулятора[5].

*Перейдемо до вивчення принципу дії позиційних регуляторів, для цього використаємо матеріали підручників[3,5]*

Позиційні регулятори належать до регуляторів дискретної дії, у яких регулююча дія змінюється дискретно залежно від рівня вхідного сигналу. Регулювальний орган (РО) у такої АСР може займати кілька фіксованих положень (позицій) за певних значень відхилення регульованого параметра. Залежно від кількості позицій РО розрізняють дво-, три- і чотирьопозиційні регулятори.

У найпростішого і найпоширенішого двопозиційного регулятора РО може займати тільки два положення – відкрите або закрите, причому перехід із одного положення в інше відбувається майже миттєво. Статичну характеристику двопозиційного регулятора показано на рис. 5.19. Якщо регульована величина досягає значення  $x_{зад} + \delta$ , РО перемикається ( $\mu=0$ ) та припиняє подачу енергії або речовини на об'єкт; зі зменшенням параметра до  $x_{зад} - \delta$  РО знову здійснює подачу енергії на об'єкт ( $\mu=1$ ). Величину  $\delta$  називають зоною нечутливості регулятора, тобто РО вмикається та вимикається з відхиленням параметра від заданого значення на величину  $\delta$ .

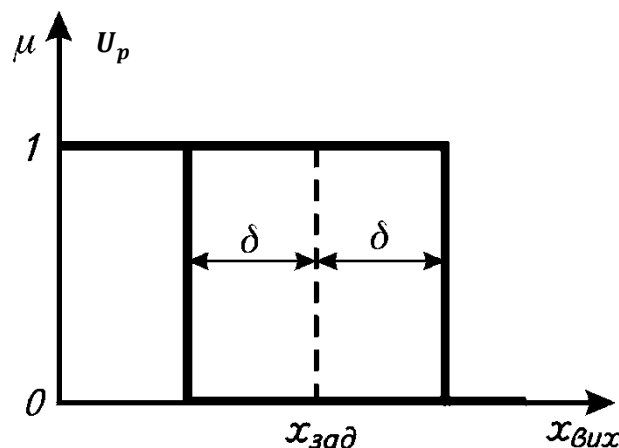


Рисунок 5.19.. – Статична характеристика двопозиційного регулятора[5].

Перехідний процес під час двопозиційного регулювання в статичному об'єкті показано на рис. 5.20. На верхньому графіку показано зміну регульованого параметра  $x_{вих}$  відносно заданого значення  $x_3$ , на нижньому – зміну регулюючої дії  $\mu$  (для теплових об'єктів – зміна припливу тепла  $Q_{пр}$ ). Якщо величина  $x_{вих}$  нижче заданої  $x_3$ , регулятор виробляє сигнал  $\mu=1$ , що приводить до збільшення  $x_{вих}$ . Із досягненням параметром значення  $x_3+\delta$  регулююча дія стрибкоподібно зменшується до  $\mu=0$ , унаслідок інерційності системи ще деякий час продовжує зростати, а потім починає зменшуватись. Як тільки параметр досягає значення  $x_3-\delta$ , регулятор знову вмикається. Таким чином, регульована змінна здійснює незгасаючі коливання з амплітудою  $x_a$  та періодом  $T_a$  відносно заданого значення. Такий процес регулювання називається *автоколивальним*. Параметри автоколивальних залежать від зони нечутливості регулятора, динамічних властивостей об'єкта та його навантаження. Зміна параметра в межах зони нечутливості не призводить до зміни регулюючої дії, тому збільшення зони нечутливості викликає збільшення амплітуди та періоду автоколивальних. При цьому точність регулювання знижується, але спрацювання регулювальних органів менше, бо вони рідше перемикаються. Більш плавним регулювання можна зробити, використовуючи багатопозиційні регулятори.

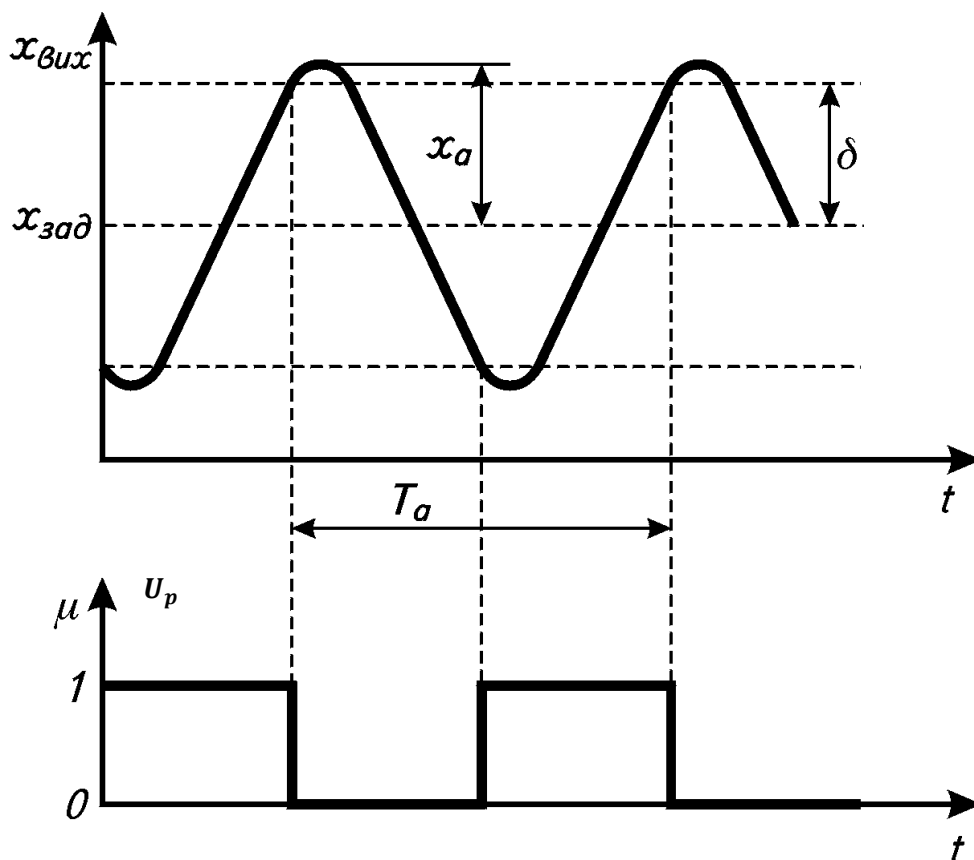


Рисунок 5.20. – *Перехідний процес та зміна регулюючої дії у двопозиційній АС*

Позиційні (релейні) регулятори встановлюються на об'єктах із високою ємністю, коли не вимагається висока точність регулювання. [5]

**У харчовій промисловості широке розповсюдження  
набули регулятори безперервної дії**

За видом закону регулювання регулятори безперервної дії розподіляються на пропорційні (П-регулятори), інтегральні (І-регулятори), пропорційно-інтегральні (ПІ-регулятори), пропорційно-інтегрально-диференційні (ПІД-регулятори).

*Пропорційні регулятори. (П-закон).* У пропорційних П-регуляторах регульована дія пропорційна сигналу неузгодження.

$$U_p = K_p \Delta x \quad (5.53)$$

або

$$\frac{dU_p}{dt} = K_p \frac{d\Delta x}{dt} \quad (5.54)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт передавання П-регулятора – параметр його налагодження. Перехідна характеристика П-регулятора є сталою в часі, бо

$$h(t) = U_p(P) = K_p \quad (5.55)$$

Передавальна функція П-регулятора має вигляд

$$W_p(P) = K_p \quad (5.56)$$

*Інтегральні регулятори.* Інтегрувальний закон (І-закон) регулювання передбачає інтегральну залежність регульовальної дії  $U_p$  від неузгодження  $\Delta x$

$$U_p = \frac{1}{T_i} \int_0^{t_p} \Delta x_i dt, \quad (5.57)$$

де  $T_i$  – час інтегрування – параметр налаштування І-регулятора.

Динамічна перехідна характеристика  $h(t)$  для І-закону регулювання

$$h(t) = U_p(P) = \frac{1}{T_i} t \quad (5.58)$$

*Пропорційно-інтегральні регулятори (ПІ-закон).* У них регульовальна дія пропорційна як неузгодженню, так й інтегралу від нього.

$$U_p = K_p \Delta x + \frac{1}{T_i} \int_0^{t_p} \Delta x_i dt \quad (5.59)$$

Перехідна характеристика ПІ-регулятора має вигляд

$$h(t) = U(t) = \frac{K_p}{T_i} t \quad (5.60)$$

де  $K_p$  - коефіцієнт передавання регулятора налаштування П-складової,  $T_i$  - час інтегрування (час ізодрому або час подвоєння) налаштування І-складової.

Рівняння ПІ-закону регулювання в операторній формі має вигляд

$$U_p(p) = K_p \Delta X(p) + \frac{K_p}{T_i p} \Delta X(p) \quad (5.61)$$



Передавальна функція ПІ-регулятора має вигляд

$$W_{PI}(P) = K_p + \frac{K_p}{T_i p} \quad (5.62)$$

*Пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор (ПІД-закон).*

Спочатку розглянемо ПД-закон регулювання. В ПД-регуляторах регулювальна дія пропорційна неузгодженню та швидкості його зміни (похідній від нього)

$$U_p = K_p \Delta x + T_D \frac{d\Delta x}{dt} \quad (5.63)$$

де  $T_D$  – стала часу диференціальної складової (час упередження) один із параметрів налаштування ПД-регулятора. Отже у ПД-регулятора є два параметри налаштування.

У ПІД-регулювальна дія пропорційна крім неузгодження та швидкості його зміни ще й інтегралу від неузгодження, тобто ПІД-регулятор має три регулювальні дії: П, І, Д складові.

Із них Д-складова скорочує час регулювання, І-складова усуває статичну похибку.

Перехідна характеристика ПІД-регулятора

$$U_p = K_p \Delta x + \frac{1}{T_i} \int_0^{t_p} \Delta x_i dt + T_D \frac{d\Delta x}{dt} \quad (5.64)$$

Передавальна функція ПІД-регулятора має вигляд

$$W_{PID}(P) = \frac{U_p(p)}{E(p)} = K_p \left[ 1 + \frac{1}{T_i p} + \frac{T_D p}{T_\phi p + 1} \right], \quad (5.65)$$

де  $K_p$ - коефіцієнт передачі П-складової регулятора,

$T_i$  – час інтегрування в І-складовій,

$T_D$  – час упередження в Д-складовій,

$T_\phi$  – стала часу низькочастотного фільтра у складі АСР.

На рисунку 5.21 представлено криві розгону регуляторів (з використанням матеріалів підручника [5].)

ПІД-регулятори зазвичай встановлюють на інерційних об'єктах із великим запізненням, у яких різко змінюється навантаження[5].

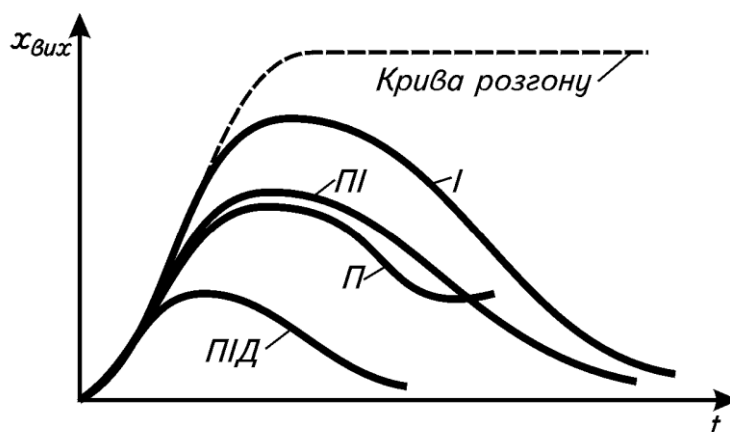


Рисунок 5.22. – *Перехідні процеси в АСР із застосуванням різних законів регулювання*[5].

На рис. 5.21. показано криві зміни регульованого параметра на одному й тому ж самому статичному об'єкті за умов дії різних регуляторів[5].

### ***Контрольні запитання***

- 1. Основні типові динамічні ланки та галузі їх застосування.*
- 2. . Наведіть приклади з'єднання ланок та алгоритмічні структурні схеми автоматичних систем*
- 3. Наведіть математичні моделі та основні характеристики типових динамічних ланок: аперіодичної, коливальної, із запізненням.*
- 4. Наведіть класифікацію автоматичних систем регулювання.*
- 5. Дайте порівняльну характеристику статичних і астатичних АСР.*
- 6. Які критерії використовують для дослідження стійкість АСР?*
- 7. Назвіть основні показники якості перехідних процесів.*
- 8. Наведіть характеристики основних законів регулювання.*
- 9. Які особливості роботи системи двопозиційного регулювання?*
- 10. Які початкові дані необхідні для вибору автоматичного регулятора?*

## Тема 6. Цифрові системи керування. Основи теорії

### 6.1. Принципи побудови цифрових систем автоматизації харчових виробництв

Цифрові системи керування в останні десять років знаходять широке використання на підприємствах харчової промисловості. Вони відіграють важливу роль у керуванні виробничими процесами [1,3,5,6,9], в яких сумісна робота комп'ютера і виконуючого механізму забезпечує високу точність виконання операцій, наприклад, дозування.

На рис. 6.1 представлена функціональна схема цифрової системи керування. Комп'ютер по визначеній програмі виконує оброблення представленої у цифровій формі помилки і видає на виході сигнал також у цифровій формі. В цифровій системі керування обов'язково є комп'ютер, вхідний і вихідний сигнал якого перетворений у вигляді числового коду. Перетворення неперервного сигналу у цифрову форму виконується аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП), як показано на рис.6.1.

Вихідний сигнал комп'ютера (цифровий) перетворюється у неперервний за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП).

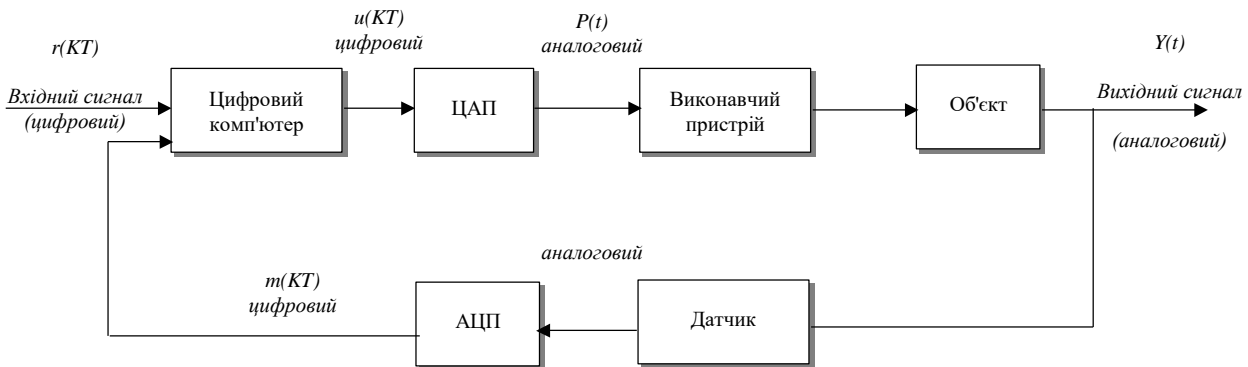


Рисунок 6.1. Функціональна схема цифрової системи керування

Отже, в системах керування зі зворотнім зв'язком функції регулятора або корегуючого пристрою може виконувати цифровий комп'ютер. Оскільки введення інформації в комп'ютер виконується через визначені інтервали часу, то необхідно розробити спеціальний метод математичного опису і аналізу якості цифрової системи керування.

Цифрові системи оперують з даними, які одержують із неперервного сигналу шляхом вибору його зі значень в рівновіддалені моменти часу. В результаті цього одержану часову послідовність даних називають дискретними сигналами. Цю послідовність можливо перетворити в область змінної  $p$  і, в кінцевому рахунку, в область змінної  $z$  за допомогою співвідношення  $z = e^{pT}$ . Область комплексної змінної  $z$  характеризується дуже подібними властивостями до області змінної  $p$  перетворення Лапласа.

Комп'ютери, що використовуються в системах керування, з'єднуються з об'єктом і виконавчим пристроєм за допомогою перетворювача сигналу. Вихідний сигнал комп'ютера надходить на цифро-аналоговий перетворювач.

Будемо вважати, що усі числа вводяться в комп'ютер і виводяться з нього з одним і тим же фіксованим періодом  $T$ , що називається періодом квантування. Якщо еталонний вхідний сигнал представляє собою послідовність дискретних значень  $r(KT)$ , а змінні  $r(KT)$ ,  $m(KT)$  і  $u(KT)$  є дискретними сигналами, то дані, що одержані про змінні системи лише у дискретні моменти часу і назначені як  $x(KT)$ , називаються квантовими даними або дискретним сигналом [6,9,19]. Оскільки вихідний сигнал ідеального квантувача  $r^*(t)$  представляє собою послідовність імпульсів з амплітудою  $r(KT)$ , то його можливо описати виразом:

$$r^*(t) = \sum_{k=0}^{\infty} r(KT)\delta(t - KT), \quad (6.1)$$

де  $\delta$  - одинична імпульсна функція ( $\delta$  - функція); сигнал  $r(t)$  виконується для  $t > 0$ .

Перетворюючи (6.1) по Лапласу одержимо:

$$L\{r^*(t)\} = \sum_{k=0}^{\infty} r(KT)e^{-KpT}. \quad (6.2)$$

Цей вираз представляє собою нескінчений ряд зі ступенем члена  $e^{pT}$ . Введемо змінну:

$$z = e^{pT}, \quad (6.3)$$

яка виконує конформне відображення з  $p$ -площини на  $z$ -площину. Тоді ми можемо визначити нові перетворення, які назовемо  $z$ -перетворенням:

$$z\{r(t)\} = z\{r^*(t)\} = \sum_{K=0}^{\infty} r(KT)z^{-K}. \quad (6.4)$$

В якості прикладу наведемо  $z$ -перетворення одиничної східчастої функції  $\beta(t)$ . Маємо:

$$z[\beta(t)] = \sum_{K=0}^{\infty} \beta(KT)z^{-K} = \sum_{K=0}^{\infty} z^{-K}, \quad (6.5)$$

тому що  $\beta(KT) = 1$  для всіх  $K \geq 0$ .

Цей ряд можливо представити у замкнутій формі, використовуючи вираз для суми членів геометричної прогресії:

$$\beta(z) = \frac{1}{1 - z^{-1}} = \frac{z}{z - 1}.$$

В загальному вигляді ми будемо визначати  $z$  - перетворення функції  $f(t)$  як:

$$z\{f(t)\} = F(z) = \sum_{K=0}^{\infty} f(KT)z^{-K}. \quad (6..6)$$

В табл. 6.1 наведені  $z$  - перетворення, що найчастіше зустрічаються в практиці керування цифровими системами на підприємствах ХП.

Таблиця 6.1.

Типові z – перетворення

X(t)	X(p)	X(z)
$\delta(t) = \begin{cases} 1, & t = 0 \\ 0, & t = K\Gamma, K \neq 0 \end{cases}$	1	1
$\delta(t - K\Gamma) = \begin{cases} 1, & t = K\Gamma \\ 0, & t \neq K\Gamma \end{cases}$	$e^{-K\Gamma p}$	$z^{-K}$
$\beta(t)$ - одинична східчаста функція	$1/p$	$\frac{z}{z-1}$
t	$1/p^2$	$\frac{Tz}{(z-1)^2}$
$e^{-at}$	$\frac{1}{p+a}$	$\frac{z}{z-e^{-a\Gamma}}$
$1 - e^{-at}$	$\frac{1}{p(p+a)}$	$\frac{(1 - e^{-a\Gamma})z}{(z-1)(z - e^{-a\Gamma})}$
$\sin \omega t$	$\frac{\omega}{p^2 + \omega^2}$	$\frac{z \sin \omega t}{z^2 - 2z \cos \omega \Gamma + 1}$
$\cos \omega t$	$\frac{p}{p^2 + \omega^2}$	$\frac{z(z - \cos \omega \Gamma)}{z^2 - 2z \cos \omega \Gamma + 1}$
$e^{-at} \sin \omega t$		$\frac{ze^{-a\Gamma} \sin \omega t}{z^2 - 2ze^{-a\Gamma} \cos \omega \Gamma + e^{-2a\Gamma}}$
$e^{-at} \cos \omega t$		$\frac{z^2 - ze^{-a\Gamma} \cos \omega t}{z^2 - 2ze^{-a\Gamma} \cos \omega \Gamma + e^{-2a\Gamma}}$

Розглянемо деякі властивості z-перетворень, які наведемо в табл.6.2.

Таблиця 6.2.

Властивості z-перетворень

п/п	X(t)	X(z)
	$KX(t)$	$KX(z)$
	$X_1(t)+X_2(t)$	$X_1(z)+X_2(z)$
	$X(t+\Gamma)$	$ZX(z)-zX(0)$
	$TX(t)$	$-Tz \frac{dX(z)}{dz}$

п/п	X(t)	X(z)
	$e^{-aT}X(t)$	$X(ze^{aT})$
	X(0), початкові значення	$\lim_{z \rightarrow \infty} X(z)$ , якщо границя існує
	X( $\infty$ ), кінцеві значення	$\lim (z-1)X(z)$ , якщо система стійка і границя існує, тобто, якщо усі полюси (z-1)(X(z)) знаходять внутрішньо одиничного кола $ z =1$ на z - площині

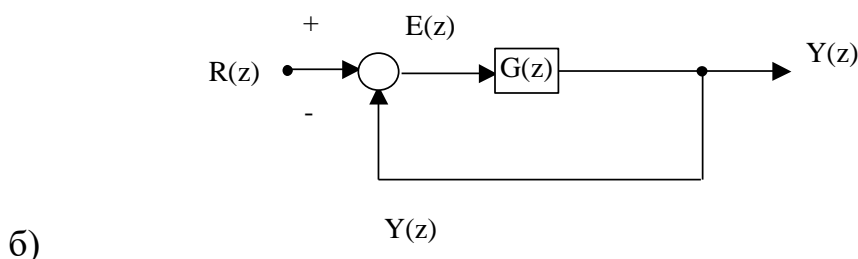
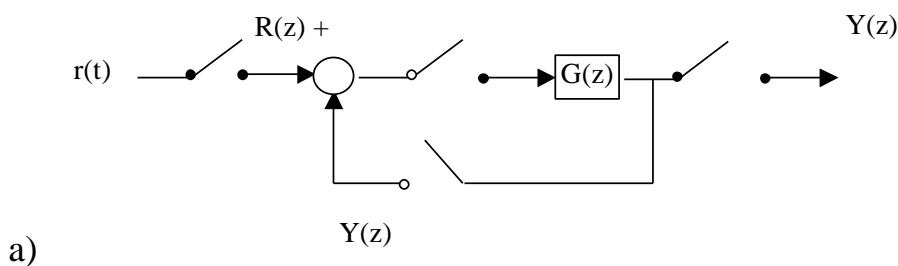
Для більш детального вивчення цифрових систем розглянемо принципи їх синтезу

### 6.2. Синтез цифрових системи керування технологічними процесами харчової промисловості

Для більш детального вивчення цифрових систем розглянемо замкнену дискретну систему, що наведена на рис.6.2(а). Оскільки значення вхідного і вихідного сигналів беремо точно у дискретні моменти часу (моменти квантування), то структуру системи можливо представити в більш простому вигляді, як наведено на рис.6.2(б).

Тоді передавальна функція замкненої системи T(z) буде мати вид:

$$\frac{Y(z)}{R(z)} = T(z) = \frac{G(z)}{1 + G(z)}. \quad (6.7)$$

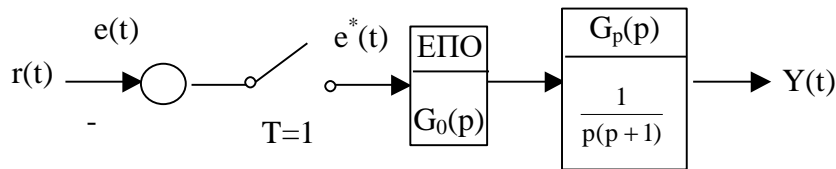


**Рисунок.6.2. Система керування з одиничним зворотнім зв'язком. G(z) є z –перетворення передавальної функції G(p), що представляє об'єкт разом з екстраполятором нульового порядку**

Для замкненої системи (6.7), якщо підставити значення  $G(z)$ , одержимо:

$$\frac{Y(z)}{R(z)} = \frac{0,3678z + 0,2644}{z^2 - z + 0,632}, \quad (6.8)$$

за умови, що  $T=1$ с, тоді замкнену систему представимо у наступному вигляді (рис.6.3.).



**Рисунок.6.3. Замкнена дискретна система**

Якщо вхідний сигнал надходить у вигляді одиничної сходишки (східець), то

$$R(z) = \frac{z}{z-1}, \quad (6.9)$$

$$i \quad Y(z) = \frac{z(0,3678z + 0,2644)}{(z-1)(z^2 - z + 0,6322)} = \frac{0,3678z^2 + 0,2644z}{z^3 - 2z^2 + 1,6322z} - 0,6322.$$

Після виконання перетворення (ділення чисельника на знаменник), одержимо:

$$Y(z) = 0,3678z^{-1} + z^{-2} + 1,4z^{-3} + 1,4z^{-4} + 1,1z^{-5} + \dots \quad (6.10)$$

На рис.6.4 представлені дослідження перехідних характеристик другого порядку для:

- а) неперервної системи ( $T=0$ );
- б) дискретної системи ( $T=1$ с).

Значення у (КТ) позначені на рис.6.6 символом ■.

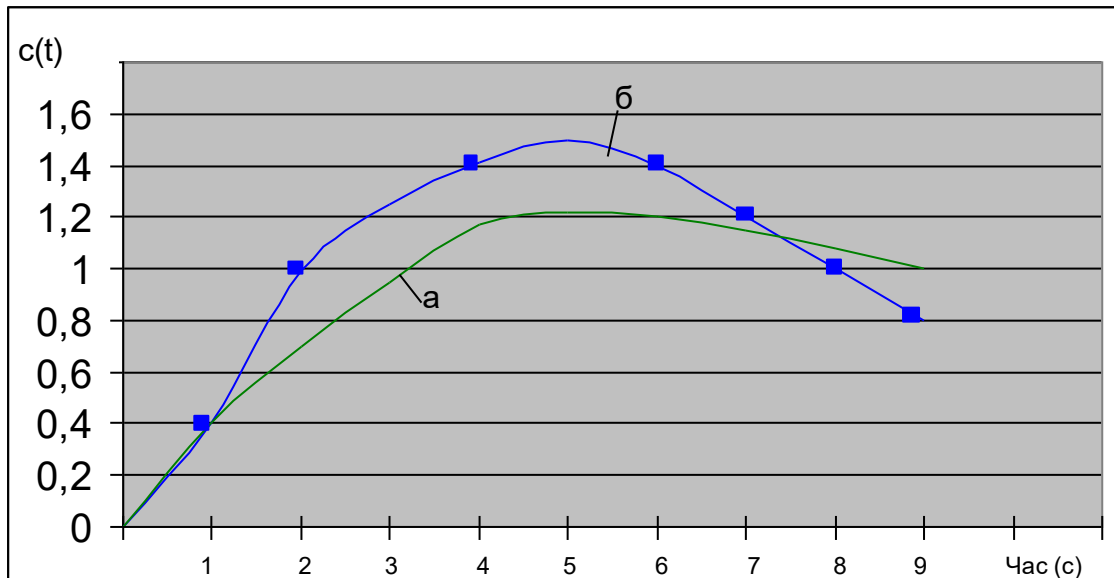
На цьому ж рисунку наведена повна реакція системи, одержана за допомогою MATLAB [9], а також для порівняння – реакція неперервної системи (при  $T=0$ ). В дискретній системі перерегулювання дорівнює 45%, тоді як у неперервній системі воно складає всього 17%.

Крім цього, у дискретній системі час встановлення у два рази більше, ніж у неперервній. Проведемо аналіз стійкості системи автоматичного керування на  $z$ -площині. Лінійна неперервна система зі зворотнім зв'язком стійка, якщо усі полюси її передатної функції  $W(p)$  розташовані у лівій половині  $p$ -площини,  $z$ -площина і  $s$ -площина пов'язані перетворенням

$$z = e^{pT} = e^{(\sigma + j\omega)T}. \quad (6.11)$$

Звідси слідує, що

$$|z| = e^{\sigma T}; \quad \arg z = \omega T. \quad (6.12)$$



**Рисунок 6.4. Результати дослідження перехідних характеристик систем другого порядку: а - неперервна система (T=0); б - дискретна система (T=1с)**

У лівій половині z-площини  $\sigma < 0$ , тому  $0 \leq |z| \leq 1$ . Уявна вісь p-площини відображена у одиничне коло на z-площині, а область всередині цього кола відповідає усій лівій половині p-площини. Отже, можемо стверджувати, що замкнена дискретна система стійка, якщо усі полюси її передатної функції  $W(z)$  розташовані на z-площині всередині одиничного кола.

На рис.6.5 представлена замкнена дискретна система, в якій об'єкт має передавальну функцію:

$$W_p(p) = \frac{K}{p(\tau p + 1)}. \quad (6.13)$$

Передавальна функція  $W(p)$  при умові, що квантування вибране довільно, має вид:

$$W(p) = \frac{K\{(z - E)[T - \tau(z - 1)] + \tau(z - 1)^2\}}{(z - 1)(z - E)}, \quad (6.14)$$

де  $E = e^{-T/\tau}$ . Запишемо характеристичне рівняння замкненої системи у вигляді:

$$W(z) = z^2 + z\{K[T - \tau(1 - E)] - (1 + E)\} + K[\tau(1 - E) - TE] + E = 0 \quad (6.15)$$

Оскільки поліном  $W(z)$  має другий порядок, а його коефіцієнти дійсні, то для того, щоб корені знаходилися всередині одиничного кола, необхідно і достатньо виконання наступних умов:

$$|q(0)| < 1, \quad q(1) > 0, \quad q(-1) > 0.$$

Ці умови були одержані шляхом переходу від характеристичного рівняння  $W(z)=0$  до рівняння  $W(p)$  і перевірки коефіцієнтів поліному  $q(p)$  на позитивність. Якщо використовувати ці умови до рівняння (6.15), то ми одержимо:

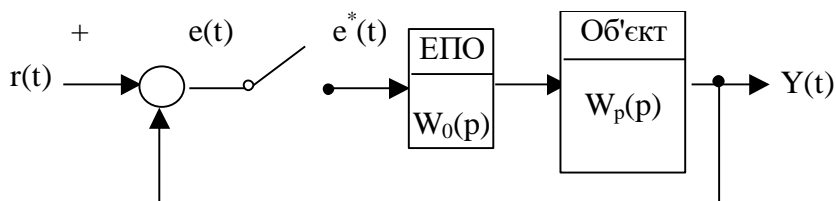


$$K\tau < \frac{1 - E}{1 - E - (T/\tau)E}, \quad (6.16)$$

$$K\tau < \frac{2(1 + E)}{(T/\tau)(1 + E) - 2(1 - E)}, \quad (6.17)$$

при  $K > 0$  і  $T > 0$ .

Для даної системи можливо обчислити максимально допустимі (із умови стійкості) значення коефіцієнтів підсилення. Відповідні результати наведені в табл.6.3 для деяких значень співвідношень  $T/\tau$ . Якщо комп'ютер, що використовується в системі, має достатньо високу швидкість обчислень і оброблення даних, то можливо встановити  $T/\tau = 0,1$  і одержати характеристики системи дуже близькі до відповідних характеристик неперервної системи (при відсутності квантування).



**Рисунок 6.5. Замкнена дискретна система**

**Таблиця 6.3.**

Максимально допустимі коефіцієнти підсилення для дискретної системи другого порядку

$T/\tau$	0	0,1	0,5	1	2
$K/\tau$	$\infty$	20,4	4,0	2,32	1,45

На рис.6.6. наведені криві, що відповідають максимальному пере регулюванню дискретної системи другого порядку при одиничному сходящому вхідному впливу.

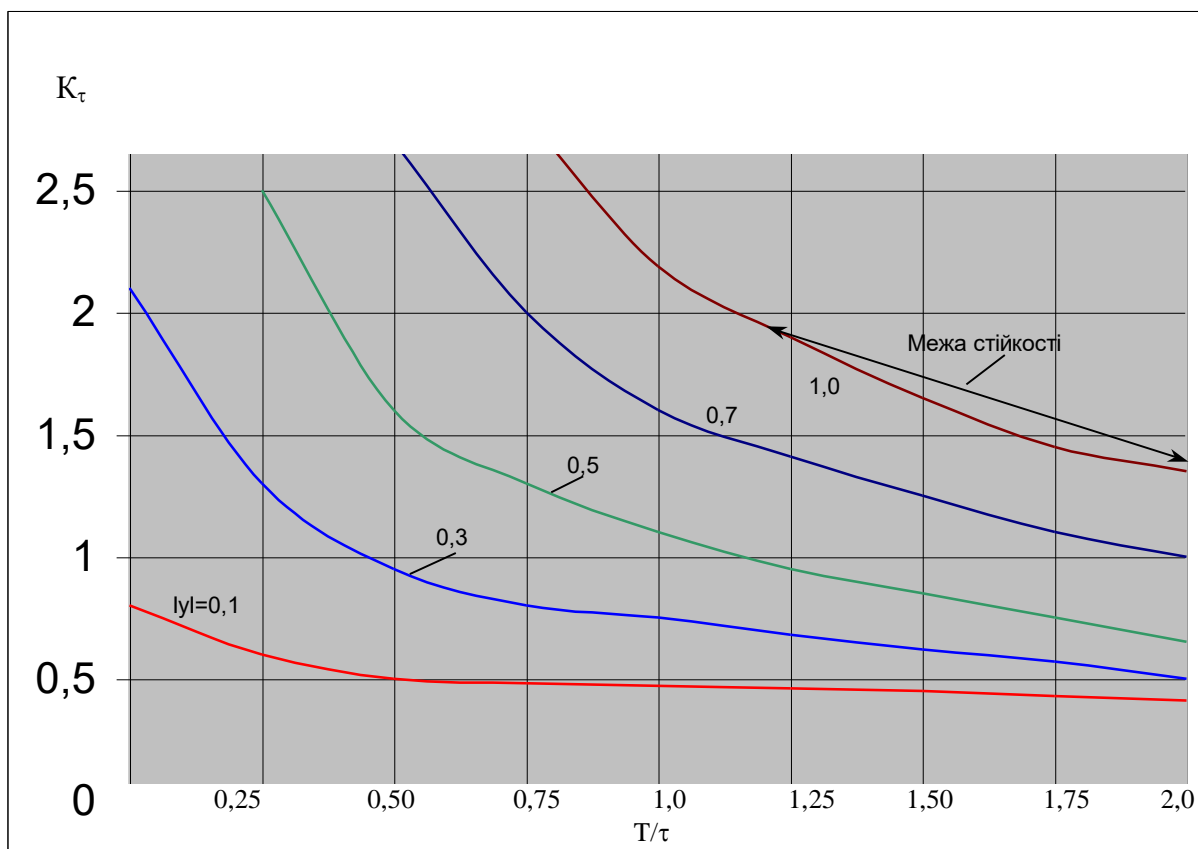
Криві значень сталої помилки при лінійному вхідному сигналу  $r(t)=t$  наведені на рис.6.6 і 6.7.

Якщо задавати відношення  $T/\tau$ , то ми можемо зменшити величину усталеної помилки, але при цьому система буде мати значно більше пере регулювання і час установалення у випадку східчастого вхідного сигналу.

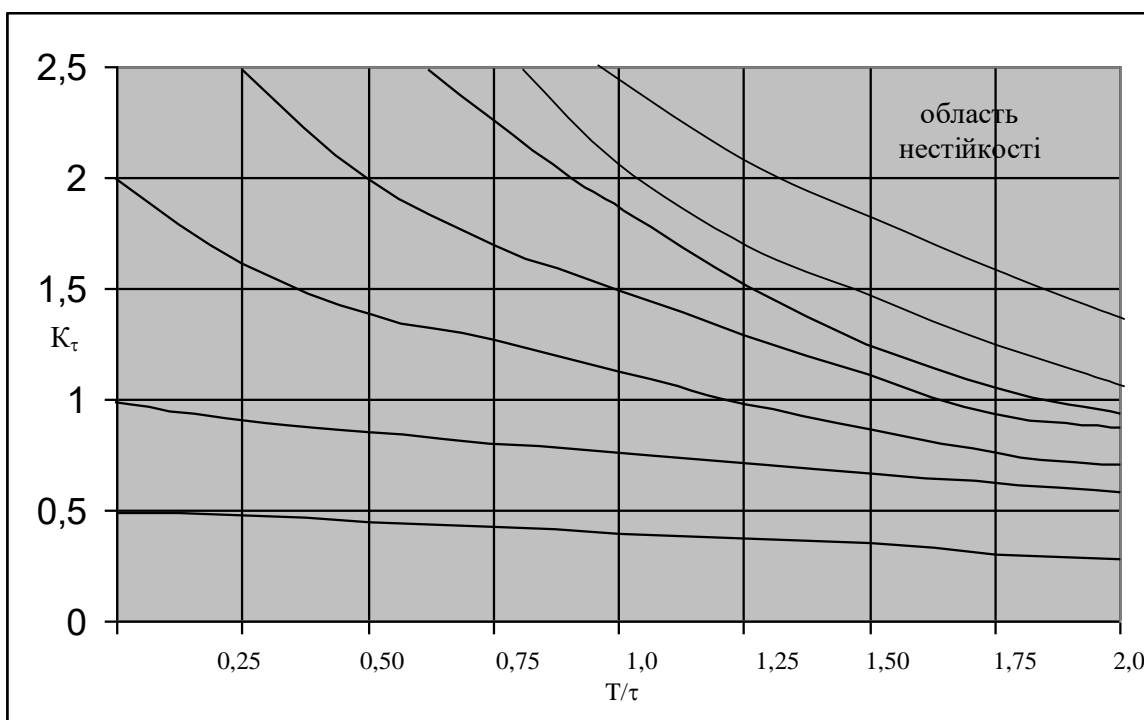
Для покращання показників якості керування робототехнологічних систем управління процесом виробництва макаронних виробів[1](САК рівнем тіста, якості вихідних показників тістомісильної машини) використовують комп'ютер (див. рис. 6.8).

Замкнена система такої САК має передавальну функцію:

$$\frac{Y(z)}{R(z)} = T(z) = \frac{G(z)D(z)}{1 + G(z)D(z)}. \quad (6.18)$$



**Рисунок 6.6. Максимальне перерегулювання  $|y|$  дискретної системи другого порядку при одиничному сходящому вхідному сигналі**



**Рисунок 6.7. Криві постійних значень усталеної помилки для дискретної системи другого порядку при лінійному вхідному сигналі  $r(t)=t, t>0$**

Комп'ютер представимо наступною передавальною функцією:

$$\frac{U(z)}{E(z)} = D(z). \quad (6.19)$$

Якщо  $D(z)=K$ , а  $T=1c$ , то перевагою використання комп'ютера в якості корегуючого пристрою буде очевидним, тоді:

$$G(z) = \frac{0,3678(z + 0,7189)}{(z - 1)(z - 0,3678)}. \quad (6.20)$$

Якщо вибрати:

$$D(z) = \frac{K(z - 0,3678)}{z + r}, \quad (6.21)$$

то ми скоротимо полюс функції  $G(z)$  в крапці  $z=0,3678$  і тоді залишається визначити два параметри  $K$  і  $r$ .

Якщо прийняти:

$$D(z) = \frac{1,359(z - 0,3678)}{z + 0,240}, \quad (6.22)$$

то тоді ми одержимо:

$$G(z)D(z) = \frac{0,50(z + 0,7189)}{(z - 1)(z + 0,240)}. \quad (6.23)$$

Обчислення реакції системи на одиничний східчастий сигнал показує, що вихідний сигнал стає рівним вхідному у четвертий момент квантування, а потім стає незмінним.

На рис.6.8 наведена реакція системи без корекції і з корекцією. Перерегулювання в скорегованій системі складає 4%, а в системі без корекції складає 45%.

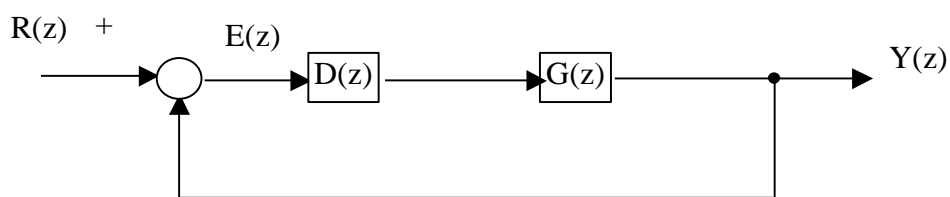
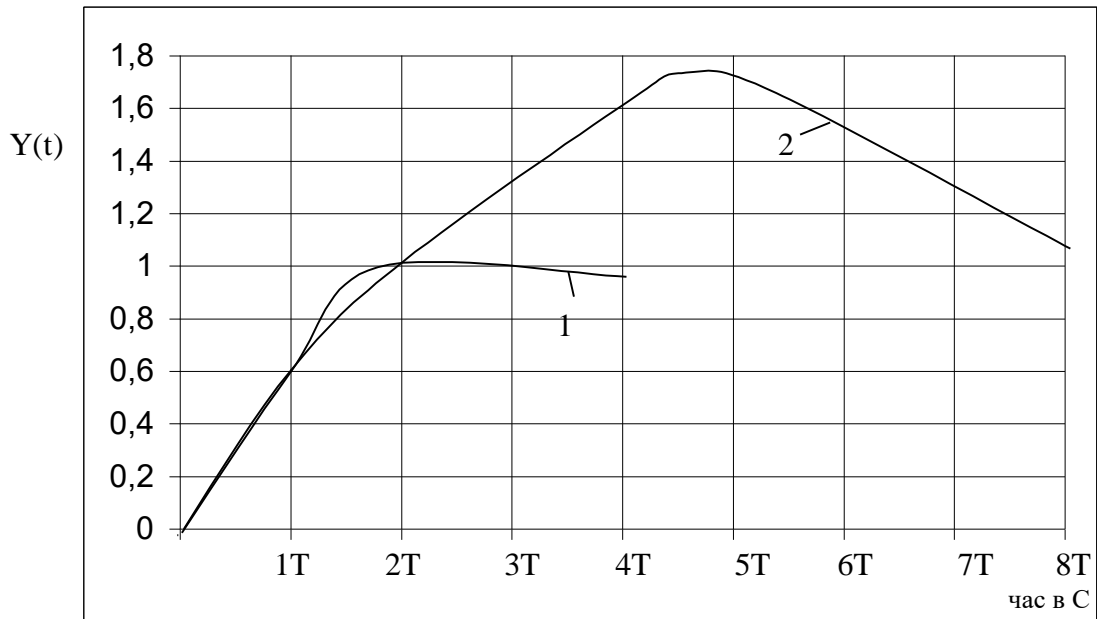


Рисунок.6.8. Замкнена система керування процесом виробництва опари



**Рисунок.6.9.Перехідні характеристики дискретної системи керування процесом виробництва опари(1 – з корекцією; 2 – без корекції)**

Перейдемо до реалізації цифрових регуляторів.

Неперервний ПІД-регулятор (6.27) запишемо у вигляді:

$$W_c(p) = K_1 + \frac{K_2}{p} + K_3 p.$$

Цифрову реалізацію цього регулятора можливо одержати, якщо використовувати дискретну апроксимацію операцій диференціювання і інтегрування. Для похідної за часом ми використовуємо правило зворотної різниці:

$$U(KT) = \left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=KT} = \frac{1}{T} \{X(KT) - X[(K-1)T]\}. \quad (6.24)$$

Застосуємо до (6.24) z-перетворення і одержимо:

$$U(z) = \frac{(1 - z^{-1})}{Tz} X(z). \quad (6.25)$$

Операцію інтегрування можливо апроксимувати за допомогою формули прямокутників:

$$U(KT) = U[(K-1)T] + TX(KT), \quad (6.26)$$

де  $U(KT)$  – вихід інтегратора у момент  $t=KT$ .

Застосуємо до (6.26) z-перетворення, одержимо:

$$U(z) = z^{-1}U(z) + TX(z), \quad (6.27)$$

звідси передавальна функція дискретного інтегратора:

$$\frac{U(z)}{X(z)} = \frac{Tz}{z-1}.$$

Таким чином, передавальна функція цифрового ПІД-регулятора має вид:

$$G_c(z) = K_1 + K_2 \frac{Tz}{z-1} + K_3 \frac{z-1}{Tz}. \quad (6.28)$$

В подальшому на основі цієї передавальної функції можливо одержати рівняння різниці, що описує алгоритм роботи цифрового ПІД-регулятора [ми використовуємо позначення  $X(KT) = X(K)$ ]:

$$\begin{aligned} U(K) &= K_1 X(K) + K_2 [U(K-1) + TX(K)] + \frac{K_3}{T} [X(K) - X(K-1)] = \\ &= [K_1 + K_2 T + \frac{K_3}{T}] X(K) - \frac{K_3}{T} X(K-1) + K_2 U(K-1) \end{aligned} \quad (6.29)$$

В останні п'ять років для об'єктів цифрового керування виробництвом харчів високої якості [1,3,14,43,44,45], в якості регуляторів (корегуючих пристроїв) почали використовувати цифрові комп'ютери. За час, що дорівнює періоду квантування  $T$ , комп'ютер здатний виконати велику кількість обчислень і сформував вихідний сигнал, який потім можливо використати для узгодженого управління технологічними стадіями і хлібозаводом в цілому.

Особливий інтерес викликають ті цифрові системи обліку, які контролюють витрати енергоносіїв, води, інгредієнтів, продуктивності секцій, складу та густини продукту, і, які за допомогою SCADA- систем приймають участь в роботі інтегрованих автоматизованих системах управління виробництвом.

Цифрові системи мають ряд переваг, серед них: підвищена точність вимірювань; використання цифрових сигналів (кодів); датчиків і перетворювачів і мікропроцесорів; менша чутливість до шумів і перешкод (завад); можливість легко змінювати алгоритм керування у програмному забезпеченні. Підвищена точність (чутливість) вимірювань параметрів сировини пояснюється тим, що цифрові датчики і пристрої працюють із слабкими сигналами. Наявність цифрових сигналів дає можливість використовувати широкий спектр цифрових пристроїв і ліній комунікацій в умовах нечіткої інформації і невизначеності природи сировини щодо виконання портфеля замовлень на харчову продукцію.

Отже, проєктування сучасних систем керування складними технологічними системами повинно здійснюватися з врахуванням оптимізації їх параметрів на основі ідентифікації нечітких параметрів сировини та стану технологічного обладнання підприємств.

### **Контрольні запитання**

1. Що таке квантування
2. Наведіть методи налагодження цифрових систем керування.
3. Подати елементи замкненої дискретної системи.
4. Перехідна характеристика цифрової системи.
5. Подати методу синтезу цифрового регулятора.
6. Подати аналіз стійкості системи автоматичного керування на  $z$ -площині.
7. Навести основні параметри цифрової системи виробництва опари.
8. Вказати особливості дискретного інтегратора.
9. Наведіть передавальну функцію ПІД-цифрового регулятора.
10. Перерахуйте переваги цифрових систем керування технологічними процесами

## Тема 7. Мікропроцесорні системи керування складними технологічними процесами виробництва харчів

### 7.1. Основи теорії мікропроцесорних систем керування технологічними процесами харчових виробництв

Мікропроцесор (МП) - функціонально закінчений, керований збереженою у пам'яті програмою (здебільшого 8, 16, 32 - розрядні) пристрій оброблення цифрової інформації., виконаний у вигляді однієї чи кількох або надвеликих інтегральних схем. За своїми функціями та структурою він нагадує спрощений варіант процесора звичайних ЕОМ. Мікропроцесорна система(МПС) представляє собою функціонально закінчений пристрій, який складається із одного або декількох пристроїв, основу яких складає мікропроцесор. Мікропроцесор характеризується великим числом параметрів й властивостей, так як він, з одного боку. є складним обчислювальним пристроєм, а з іншого боку є електронним приладом. Як засіб обчислювальної техніки він характеризується, по-перше своєю архітектурою, тобто сукупністю програмно-апаратних якостей, наданих користувачу. Сюди віднесемо систему команд, типи та формати оброблених даних, режими адресації, число та розподіл регістрів, принципи взаємодії з оперативною пам'яттю і зовнішніми пристроями. По-друге мікропроцесор призначений для рішення задач цифрового оброблення різного типу інформації - від інженерних розрахунків до роботи з базами даних, не зв'язаними жорсткими обмеженнями на час виконання завдання. Цей клас мікропроцесорів одержав найбільше розповсюдження на підприємствах. До нього відносяться такі відомі мікропроцесори, як МП ряду Pentium фірми Intel і МП родини Athlon- фірми AMD, фірми Siemens [40,41,43].

Архітектуру мікропроцесорів розділимо на декілько типів (див. рис 7.1).

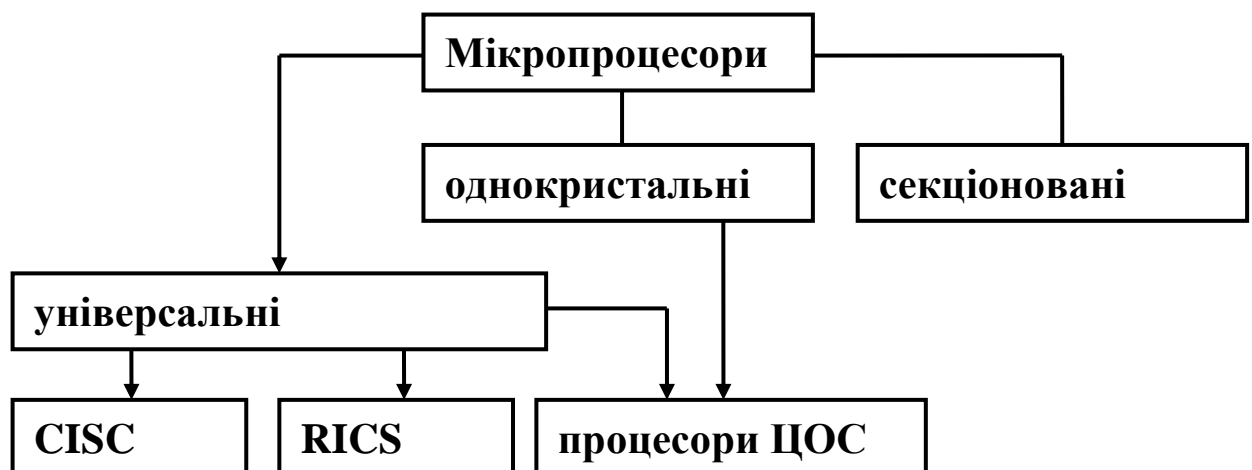


Рисунок 7.1. – Класифікація мікропроцесорів

Універсальні мікропроцесори будемо розділяти на CISC та RISC мікропроцесори, CISC-мікропроцесори (completed instruction set computing- обчислення з повною системою команд) мають в своєму складі весь класичний набір команд з широко розвинутими режимами адресації операндів. Саме до цього класу відносяться, наприклад, мікропроцесори класу Pentium, У той же час RISC- мікропроцесори (reduced instruction set computing- обчислення зі скороченою системою команд) використовують, як слідує із визначення, зменшене число команд та режимів адресації.

У нашому випадку слід виокремити мікропроцесори типу Alpha21+64, PowerPC.

Однокристальні мікроконтролери (ОМК, або частіше МК) призначені для використання в системах промислової автоматики. Вони представляють собою великі інтегральні схеми (ВІС), в які включені всі пристрої, необхідні для реалізації цифрової системи керування мінімальної конфігурації: процесор, ЗП команд, ЗП даних, генератор тактових сигналів, програмований пристрій для зв'язку зі зовнішнім середовищем ( контролер переривання, таймер-лічильник, різні порти введення- виведення, аналого- цифрові та цифро-аналогові перетворювачі) і т. п. Цей клас мікропроцесорів називають мікро-ЕОМ. До класу одно кристальних мікропроцесорів відносяться мікропроцесори серії MCS-51 фірми Intel та аналогічні мікропроцесори інших виробників, архітектура яких де-факто є стандартом. Секційовані мікропроцесори ( інша назва мікромодульні або розрядно-модульні) мікропроцесори, які призначені для побудови спеціалізованих процесорів. Вони представляють собою мікропроцесорні секції відносно невисокої розрядності з доступом користувача до мікропрограмованого рівня керування та засобами для об'єднання декількох секцій. Така організація дозволяє побудувати мікропроцесор необхідної розрядності та з спеціальною системою команд. За рахунок малої розрядності мікропроцесорні секції можуть бути побудованими з використанням швидкодіючої технології, наприклад ТТЛШ. Сукупність всіх цих факторів дозволяє створити процесори, які орієнтовані на заданий клас алгоритмів як за системою команд і режимів адресації, так і за формами даних.

Процесори цифрового оброблення сигналів або сигнальні процесори, представляють собою клас мікропроцесорів, призначених для рішення задач цифрового оброблення звукових сигналів, зображення, розпізнавання образів і т. п. Вони мають риси одно кристальних мікроконтролерів: гарвардською архітектурою, яка характеризується фізичним та логічним розділенням пам'яті програм і пам'яті даних, вбудованих у ВУС, з розвиненими можливостями роботи зі зовнішнім пристроєм. У той же час у них присутні риси універсальних МП, особливо з RISC- архітектурою: конвеєрна організація роботи, програмні і апаратні засоби для виконання операцій з плаваючою комою, апаратна підтримка складних спеціалізованих обчислень. особливо множення.

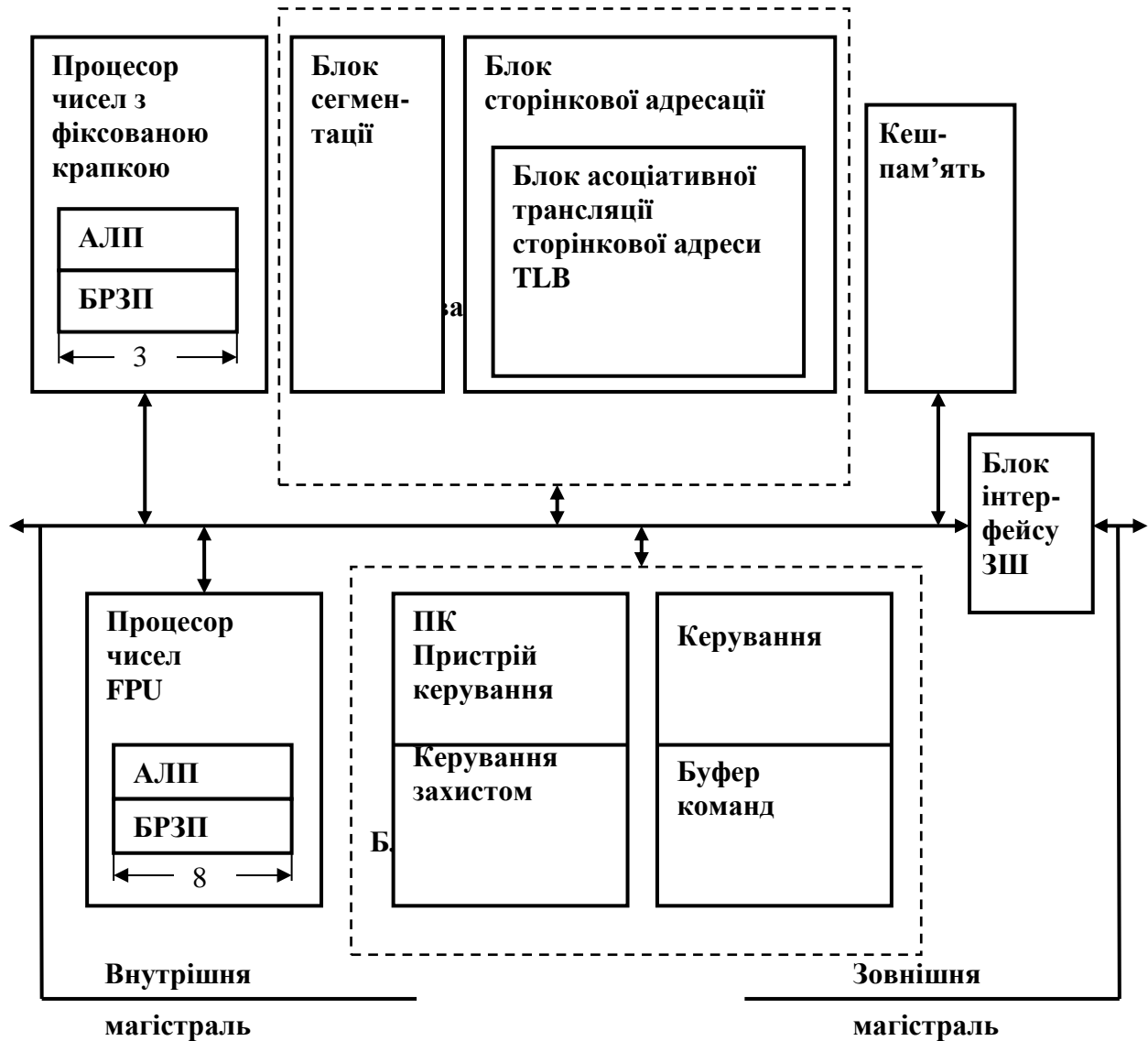
Як електронний пристрій МП характеризує наступні чинники:

- 1) Вимоги до синхронізації: максимальна частота, стабільність;
- 2) Кількість та номінали джерел постачання, вимоги до їх стабільності;



- 3) Потужність розсіяння; 4) Рівні сигналів логічного нуля та логічної одиниці, які зв'язані з номінальними джерелами постачання; 5) Тип корпусу;
- 6) Температура навколишнього середовища, при якій може працювати схема; 7) Завадостійкість; 8) Властивість до навантаження; 9) Надійність;
- 10) Характеристики технологічного процесу.

Перейдемо до вивчення 32-розрядного універсального мікропроцесора. Структура такого мікропроцесора наведена на рис.7.2.



**Рисунок 7.2. – Структура універсального мікропроцесора**

Спочатку розглянемо склад та призначення основних блоків цього МП. Процесор оброблення чисел з фіксованою крапкою має 32-розрядний арифметико-логічний пристрій (АЛП) та блок регістрів загального призначення. Арифметико-логічні пристрої - призначені для виконання простих арифметичних операцій різних пересилань і різноманітних зсувів інформації та операцій булевої алгебри над початковими операціями. Блок регістрів загального призначення (БРЗП), до складу якого входять як регістри, доступні для програміста, тобто ті, зміст яких можна змінювати безпосередньо, так і

реєстри тимчасового зберігання. не доступні для нього.

Пристрій керування (ПК) координує роботу АЛП, блока реєстрів у процесі виконання команди, що надійшла в процесор. Мікропроцесор має внутрішню шинну організацію, що переходить у зовнішню шину (магістраль): шину даних, шину адреси, шину керування. Процесор оброблення чисел з фіксованою крапкою (комою) включає 32- розрядний АЛП і блок внутрішніх реєстрів загального призначення. АЛП-виконує оброблення двійкових чисел довжиною 1, 2 або 4 байта без знаку, або зі знаком представляють у додатковому коді. Блок реєстрів загального призначення (БРЗП) має вісім 32-розрядних реєстрів, частина із яких допускає 16 та 8 розрядне звернення. Процесор оброблення чисел з плаваючою крапкою складається із 80 розрядного АЛП, блока з восьми 80-розрядних реєстрів загального призначення, а також керування реєстрами. Блок керування пам'яттю (MemoryManagementUnit - MMU) складається з двох основних блоків у відповідності з організацією пам'яті. У загальному випадку пам'ять в мікропроцесорі розділяється на сегменти, які в свою чергу розділяються на сторінки. У відповідності з цим MMU має блок сегментації (або блок сегментного перетворення адреси) і блок сторінкового перетворення, до складу якого входить, так названий буфер асоціативної трансляції, адрес сторінок (TLB). Кеш-пам'ять представляє собою проміжну ступінь між оперативною пам'яттю та реєстрами мікропроцесора. Вона призначена для збереження найбільш часто використовуваної інформації. До складу блока керування входить:

- пристрій керування, тобто та класична схема, яка під дією коду команди відпрацьовує набір керованих сигналів, які надходять як на різні вузли мікропроцесора, так і на блок інтерфейсу зовнішньої шини;
- керування захистом пам'яті: забезпечує апаратний захист програм та даних щодо керування пам'яттю та за привілеями;

- блок керування перед виборкою команд: реалізує упередковано заповнення буфера команд, який представляє собою деяку буферну пам'ять. Буфер команд має ємність 32 байта та заповнюється командами із слідуючих комірок пам'яті команд по мірі свого визволення. Цим забезпечується прискорене оброблення мікропроцесором наступної команди. Блок інтерфейсу зовнішньої шини виконує електричне узгодження параметрів внутрішньої магістралі з сигналами зовнішніх магістралей, формування необхідних сигналів на зовнішню магістраль й прийом сигналів із зовні. Зовнішня магістраль мікропроцесора складається із шини адреси, шини даних і сигналів керування:

- шина даних має ширину 32 розрядів;
- 32 розрядна адреса передається по 34- розрядній шині.

Щоб з мінімальними втратами узгодити 32-розрядну шину даних в процесі їх передачі меншої розрядності, молодші розряди адресу (A<sub>1</sub>,A<sub>0</sub>) передаються у дешифрованому вигляді (B<sub>3</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>1</sub>, B<sub>0</sub>). ША=A<sub>31</sub>...A<sub>2</sub> +(B<sub>3</sub>,B<sub>2</sub>,B<sub>1</sub>,B<sub>0</sub>), Ці розряди показують, які саме байти із 32-розрядної шини даних у цей момент реально потрібні: 1 байт, 2 молодших байта, два старших байта або всі 32 розряди даних; - шина керування 32-розрядна. По ній

передаються сигнали запису і читання змісту оперативної пам'яті та зовнішніх пристроїв, сигналів записів перериванням, прямого доступу до пам'яті тощо. Особливим інтерес представляють режими роботи мікропроцесора: реальний, захищений та режим віртуального МП i8086. Центральним елементом 32-розрядного МП є арифметично-логічний пристрій (АЛП), який за командами блока керування виконує арифметичні та логічні операції над даними. Блок реєстрів - склад, структура і призначення реєстрів універсального МП є важливими характеристиками його архітектури та в багатьох випадках визначають його функціональні можливості. В універсальному 32-розрядному МП виокремлюють наступні групи реєстрів: - основні функціональні; процесори з плаваючою комою; системні; налагодження та тестування. Перші дві групи використовують прикладні програми, останні дві групи – системні програми, які мають найвищий рівень привілей. Ці пристрої з'єднані інформаційними магістралями - внутрішніми шинами: керування, адреси, даних. Пристрій керування керує роботою АЛП та блоком реєстрів загального призначення, який є внутрішньою пам'яттю МП й призначений крім тимчасового зберігання даних і команд також для деяких операцій оброблення інформації. Зовнішній зв'язок МП реалізовується за допомогою зовнішніх магістралей (зовнішніх шин): керування, даних, адреси, з'єднаних з внутрішніми. Універсальний мікропроцесор доповнено запам'ятовувальними пристроями і пристроями введення та виведення інформації, а крім того його запрограмовано на обмін інформацією між МП та ОК. У кожному МП є оперативна пам'ять (ОЗП-оперативний запам'ятовувальний пристрій) та постійна (ПЗП-постійно запам'ятовувальний пристрій) пам'ять і пристрій введення-виведення (ПВВ), призначені для одержання й оброблення числової інформації та керування цим процесом. Основними операціями з пам'яттю є записування-занесення інформації до пам'яті та зчитування тобто вибирання її з пам'яті. Ці операції будемо називати зверненням до пам'яті. Пам'ять характеризується ємністю, розрядністю вибірки, часом звернення і споживаною електропотужністю. Розвиток мікропроцесорної техніки в сфері сучасних універсальних МП іде шляхом постійного підвищення їх продуктивності. За деякими оцінками продуктивність системи пропорційна квадратному кореню із числа виконавчих блоків.

На даному етапі розвитку МП з метою підвищення їх продуктивності використовують ряд нових підходів:

1. Напрямок SMT( Simultaneous Multi Threading) - багато ниткова архітектура;
2. CMP (ChipMultiProcessing)- створення на одному кристалі системи із декількох мікропроцесорів (багато ядерність);
3. EPIC (ExplicitlyParallelInstructionComputing)- обчислення з явним паралелізмом у командному слові.
4. Метод збільшення розрядності.

У перших МП розрядність оброблюваних слів складала 8 біт. Потім з розвитком інтегральної технології підвищувалась ступінь інтеграції ВІС, що дозволило створити 16-розрядні МП. Починаючи з появи МП Intel 80386,

розрядність оброблюваних слів складала 32 біт. Для більшості систем МП керування в харчовій промисловості, у тому числі для адаптивних систем, АРМ оператора, розподілених систем керування цієї розрядності достатньо.

Розроблені в останні десять років 64- розрядні однокристальні комп'ютери забезпечують іще більшу продуктивність. Крім розрядності оброблювальних слів для мікропроцесорних систем важливим є розрядність адресів, з якими може працювати МП. Це визначає об'єм адресної пам'яті системи, а отже, і можливості роботи з більшим об'ємом програм і оброблених даних, більш удосконаленим програмним забезпеченням, більш продуктивною і зручною для користувача оперативною системою. Процесори останнього покоління Pentium орієнтовані на рішення задач мультимедіа, які вимагають інтенсивних операцій з цілими числами. Подібні задачі вирішують комунікаційні, навчальні програми, які використовують графіку, аудіо, 3Д-зображення тощо.

У промисловості поширені також 64-розрядні МП фірми AMD родини K-8 Athlon 64, Opteron (2003 рік). Переваги процесорів K-8 виявляються під час роботи з великими базами даних і системами САПР (CAD- системи). У порівнянні з 32-бітною адресацією в 4Гб пам'яті при 64-бітній адресації комп'ютер одержує в своє розпорядження 16Тб.

Сучасні великі БД уже значно перевищили об'єм в 4Гб. Процесори фірми AMD можуть працювати як в режимі сумісності з 32-бітним програмним додатком, так і з 64-бітним. Для повної реалізації таких МП використана 64-бітна ОС Windows. Важливою перевагою МПК-8 є можливість організації над продуктивних багато продуктивних структур завдяки новому трьохмірному високошвидкісному інтерфейсу HyperTransport, через який процесори зв'язані між собою.

Ці методи підвищення продуктивності МП детально описані в [39,40,41,42] та надають інформацію користувачам, з точки зору проєктних рішень. щодо розробки АСУ-АСУТП з 64- розрядними ЕОМ у верхньому рівні управління.

## **7.2. Нейрокомп'ютери в системах керування виробництвом продуктів харчування**

В АСУТП, які розроблені вченими Доннует імені Михайла Туган-Барановського м.Кривий Ріг [1,13] важливу роль відіграють нейро - комп'ютери.

Розглянемо концепцію нейро-комп'ютерної архітектури (NeuroComputer, NC).

Нейрокомп'ютер - це обчислювальна система з паралельними потоками однорідних команд й множиною потоків даних, в яких процесорний елемент однорідної системи спрощений до рівня нейрона, різко ускладненні зв'язки між елементами, а програмування перенесено на зміну вагових коефіцієнтів зв'язків між обчислювальними елементами. Нейрон виконує зважене підрахування сигналів, які надходять на його вхід.

Нейрокомп'ютер побудований на основі нейронної мережі та реалізує нейромережеві алгоритми. Нейронною мережею (НМ) називають динамічну систему, яка складається із сукупності зв'язаних між собою по типу вузлів

направленого графа елементарних процесорів, які називають формальними нейронами, і здатних генерувати вихідну інформацію у відповідь на вхідні впливи [8,27,31,39] Нейрона мережа є основною операційною нейронних ЕОМ, які використовуються в вузлах нейронної мережі.

Математична модель формального нейрона може бути представлена у вигляді:

$$Y=f(a_ix_i+x_0), \quad (7.1)$$

де  $y$ - вихідний сигнал нейрона;

$x_i$ -  $i$ -й вхідний сигнал;

$a_i$ - вага  $i$ -го входу,

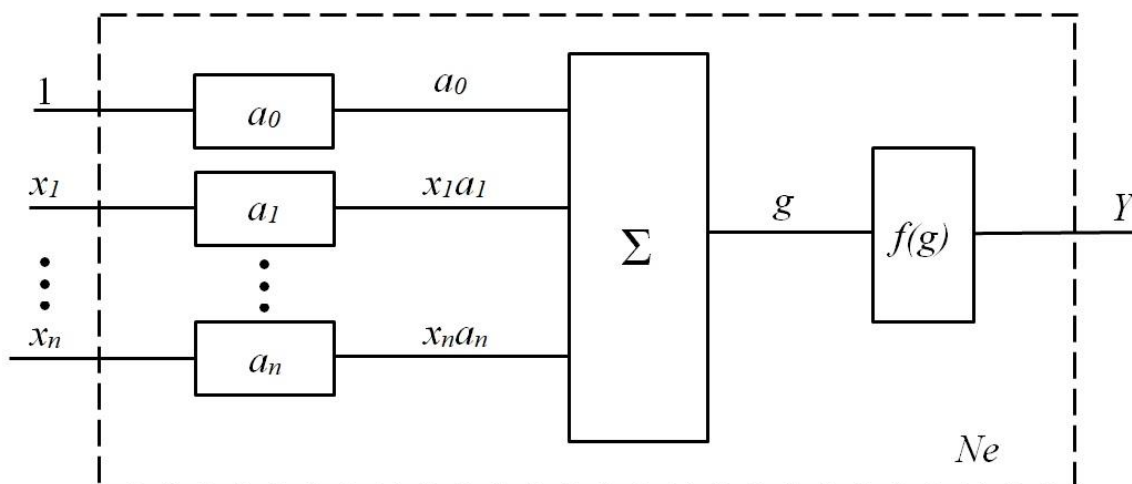
$x_0$ - початковий стан нейрона;

$i=1,n$ - номер входу нейрона;

$n$ - число входів;

$f$ -функція вихідного блоку нейрона (функція активації).

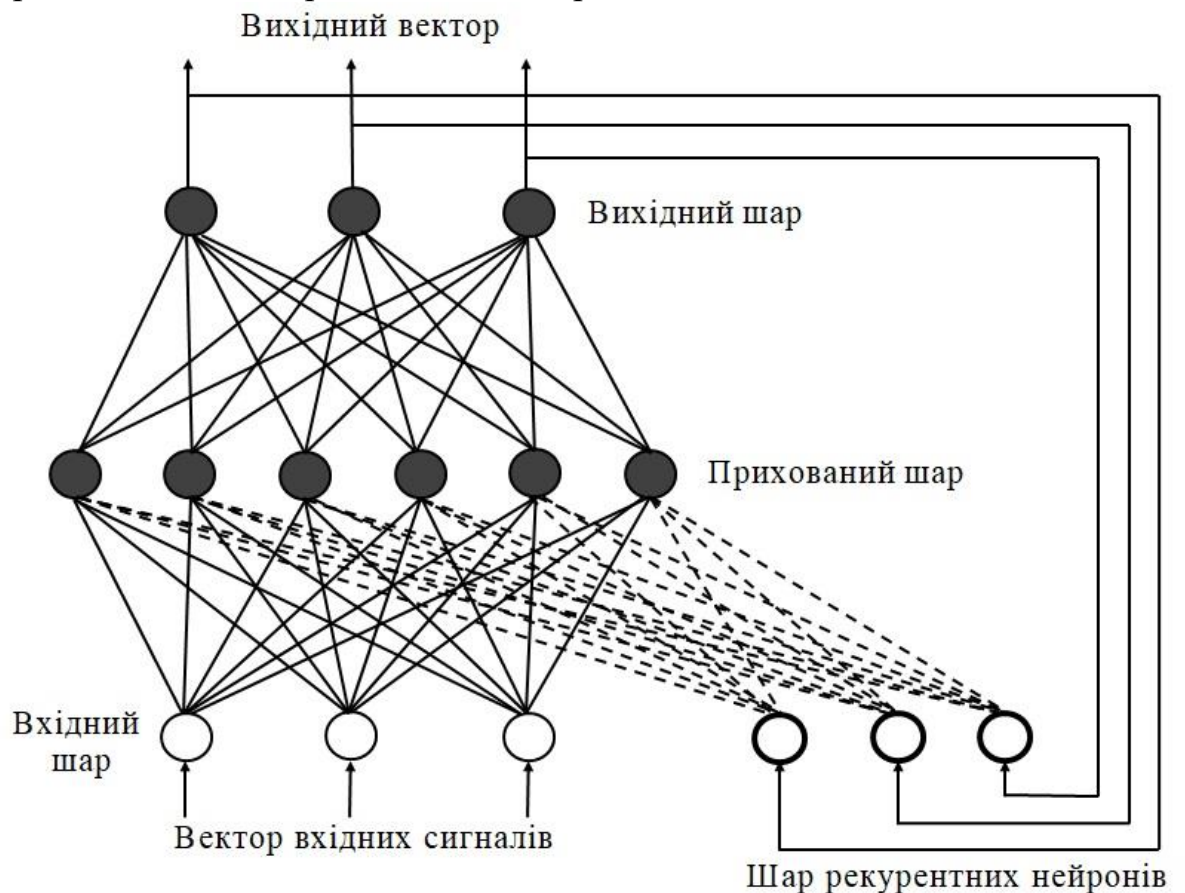
Підсумовування в (7.1) виконується по параметру  $i$ . Виразу (7.1) відповідає наступна структурна схема, яка наведена на рис.7.3.



**Рисунок 7.3. Структурна схема формального нейрона**

Як слідує із схеми в суматорі виконується зважене не підсумування вхідних сигналів. Ця функція подається на блок функціонального перетворювача  $f(x)$ . Функція, яка реалізує цей блок, одержала назву функції активації (або функції збурення, або перехідна функція). Функція активації може бути лінійною з насиченням, релейною, квадратичною, сигмоїдальною і т.п. Вигляд функції активації в багатьох випадках визначає обчислювальні можливості нейронної мережі, яка складається із формальних нейронів [2,8,20,25]. Графічну інтерпретацію з'єднання нейронів між собою будемо називати топологією. В АСУТП виробництва смарт-продуктів розповсюджені багат шарові мережі для розпізнавання виробничих ситуацій, оцінки стану працездатності обладнання. якості сировини, параметрів густини тіста тощо.

На рис. 7.4 наведено схему багатошарової нейронної мережі, в якій є вхідний шар, два схованих шари і вихідний шар.



**Рисунок 7.4. - Схема багатошарової нейронної мережі**

На нейрони вхідного шару подаються вхідні сигнали (вхідний вектор  $\{X_1, X_2, \dots, X_k\}$ ), закодований вхідний вплив або образ зовнішнього середовища, шляхом активації нейронів цього шару. Виходи нейронів вихідного шару є виходами мережі. Множину вихідних сигналів  $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_k\}$  називають вектором вихідної активності або патерном активності нейронної мережі. У процесі функціонування (еволюції станів) мережі виконується перетворення вхідного вектора у вихідний. В задачах розпізнавання образів вхідний вектор виконує набір ознак, а вихідний – розпізнавання образів. Сховані шари призначені для віддзеркалення специфіки знань, в таких мережах зазвичай використовують передавальні сигмоїдальні функції. Структура нейронної мережі визначається числом вузлів, наприклад 25-10-5, тобто 25 вузлів знаходиться в першому шарі, десять в схованому і п'ять у вихідному. Визначення числа схованих шарів й числа нейронів в кожному шарі для конкретної задачі є неформальною проблемою, при рішенні якої можливо використати наступне евристичне правило: число нейронів в наступному шарі у два рази менше ніж у попередньому [27,31].

### 7.3. Концепції побудови систем мікропроцесорного керування технологічними процесами харчових виробництв

Мета проєктування і впровадження систем керування: забезпечення якості продукції, збільшення економічності виробництва, підвищення надійності функціонування обладнання, підвищення продуктивності, забезпечення екологічності та безпечності умов праці обслуговуючого персоналу.

На рис. 7.5 наведено піраміду комплексної цифровізації підприємства харчової промисловості.

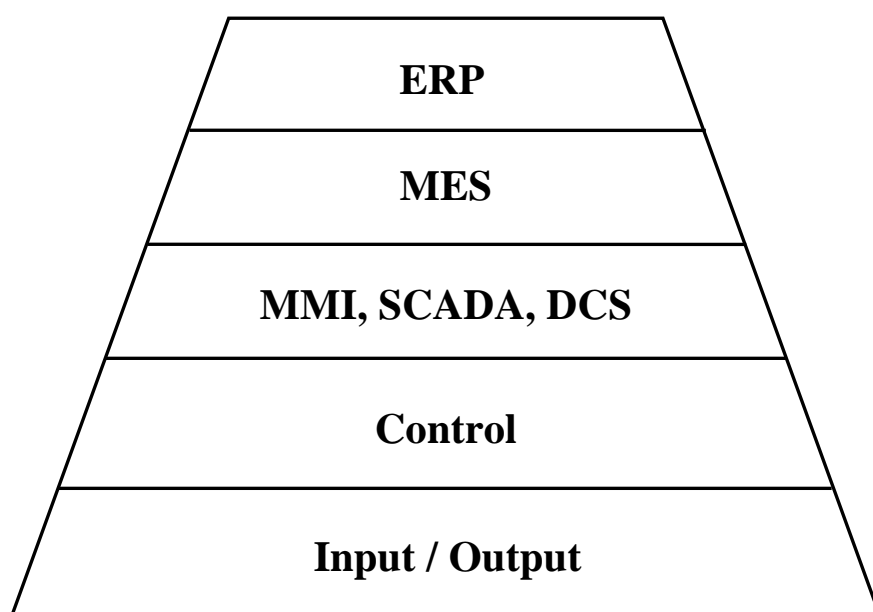


Рисунок 7.5. – Піраміда комплексної автоматизації підприємства

В системі цифрового управління підприємством нижні рівні мікропроцесорного керування виробництвом продукції 5-4-3 представляють: 5-цифро-аналогові датчики та ВМ I/O (Input/output); 4-засоби локального керування (Control); 3- станції технічного оперативного керування персоналу MM1 (MenMachingInterface), спроектовані на основі SCADA DCS систем; 2- системи диспетчерського управління MES; 5. ERP системи планування ресурсів та стратегічного управління. В таких багаторівневих системах цифрового управління підприємством [1,13]

режим функціонування систем керування – автоматизований (оператор – технолог + ЕОМ ). Система керування – цифрова. Під мікропроцесорними системами керування (МПСК) будемо розуміти комплекс апаратних і програмних засобів, який під впливом оператора – технолога або автоматично керує станом будь – якого об'єкту виробництва смарт- продукції харчування. Робота МПСК щодо керування реальними об'єктами, як правило, виконується: з необхідністю обміну інформації з великим числом зовнішніх пристроїв; рішенням багатьох задач у реальному масштабі часу керування об'єктами виробництва смарт- продукції харчування.

Ці умови необхідно враховувати при проектуванні архітектури МПСК.( структури і системного ПЗ ). Із структурних особливостей МПСК слід відмітити:

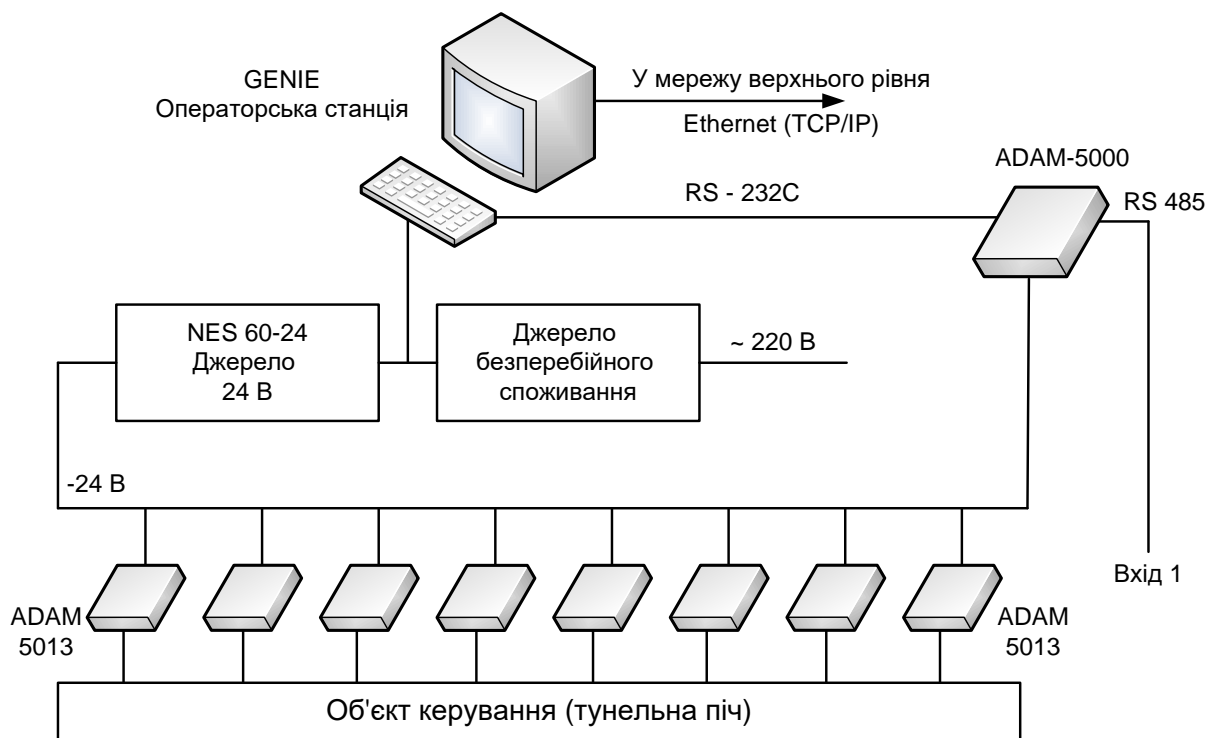
1) Розвинену структуру спряження з великою кількістю зовнішніх пристроїв ( ВМ, датчиків інформації); 2) використання різного роду каналів введення- виведення стандартного інтерфейсу; 3) розвинену систему засобів керування та відображення інформації; 4) значну систему пам'яті ( використання ОЗУ, ПЗУ ППЗУ великої інформаційної ємності і швидкості );

5) наявність системи апаратного контролю ;6) наявність лічильників РЧ. Системне ПЗ МПСК повинно бути орієнтоване на виконання обчислень в реальному масштабі часу, забезпечення обміну інформації в часі рішення задач, великий об'єм використання даних і прикладних програм велике число операцій логічного перетворення пошуку та впорядкування інформації, використання ПЛ способів захисту від можливих збоїв і відмовлень.

Структуру МПСК представляють системно-орієнтовані контролери та модулі, які виконують збирання інформації і автоматичне керування технологічним процесом. Будемо проектувати МПСК на основі контролерів серії АДАМ-4000, АДАМ-5000. Вона представляє собою компактні та інтелектуальні пристрої оброблення сигналів датчиків, формування сигналів керування ВМ. Об'єктом керування є хлібопекарні пічі хлібозаводу. Для випікання хліба і хлібобулочних виробів використовують пекарні камери різних конструкцій з температурою тепловіддаючих поверхонь 300-400С, паропровідного середовища пекарної камери 200-250С. У процесі випікання тісто в пекарній камері швидко збільшується в об'ємі. Через деякий час приріст його об'єму різко сповільнюється, а потім припиняється. Температура м'якуші наприкінці випікання не перевищує 100С, тоді як температура поверхні хліба швидко досягає 105С і під кінець випікання підвищується до 180С, Поверхня тіста інтенсивно прогривається і через 1-2хв. втрачає майже всю вологу, досягаючи рівноважної вологості пекарної камери. У зв'язку з поганою волого провідністю тіста та великою різницею температур його поверхневих і внутрішніх шарів (явище термовологопровідності) волога до поверхні надходить повільніше за інтенсивність її зневоднювання, тому в хлібну камеру вприскують за допомогою ультразвукових диспергаторів воду для керування заданих параметрів вологості. Ці важливі експертні знання технологічного процесу випікання тіста утворюють БЗ при побудові АСУТП процесу випікання.

На рис. 7.6. наведено схему системи мікропроцесорного керування процесом випікання хліба.





**Рисунок 7.6.- Схема системи мікропроцесорного керування процесом випікання хліба**

Наявність вбудованих МП дозволяє їм виконувати нормалізацію сигналів, операції аналогового і дискретного введення-виведення віддзеркалення даних та їх передачу (або прийом) по інтерфейсу RS-485. Усі модулі мають гальванічну розв'язку за мережами споживання та інтерфейсу RS-485, програмну установку параметрів, командний протокол ASCII. Контролери серії ADAM-5000 призначені для проектування територіально розподілених систем збирання даних і керування. Вони забезпечують виконання наступних функцій: аналоговий вхід-вихід; дискретний вхід-вихід; прийняття команд від віддаленої обчислювальної системи і передачу в її адресу перетворення даних з використанням інтерфейсів RS – 485, ADAM -5000 складається із трьох модульних компонентів процесора, крос-плати, модулів введення- виведення. Кожний пристрій може мати 4 модулі (64 канали введення-виведення), існує гнучка конфігурація системи. Завдяки пристроїв, що входять до її складу проєктанти можуть будувати МПКС у залежності від кількості контрольованих параметрів, а також від місця розташування контрольованих об'єктів. Пристрої серії ADAM-5000 можуть об'єднуватись у багато чисельну мережу на базі інтерфейсу RS-485, яким керує центральний контролер. Представником серії ADAM -5000 є мікроконтролер ADAM -5510. IBMPC сумісний ПМК ADAM-5510 використовується в локальних та розподілених системах автоматики АСУТП відділення випікання N-сортів хлібобулочних виробів та його логістики в якості автономного контролера. Він забезпечує прийняття та видачу аналогових й дискретних сигналів, первинне перетворення сигналів запрограмованим користувачем алгоритмом і обмін інформації за послідовними

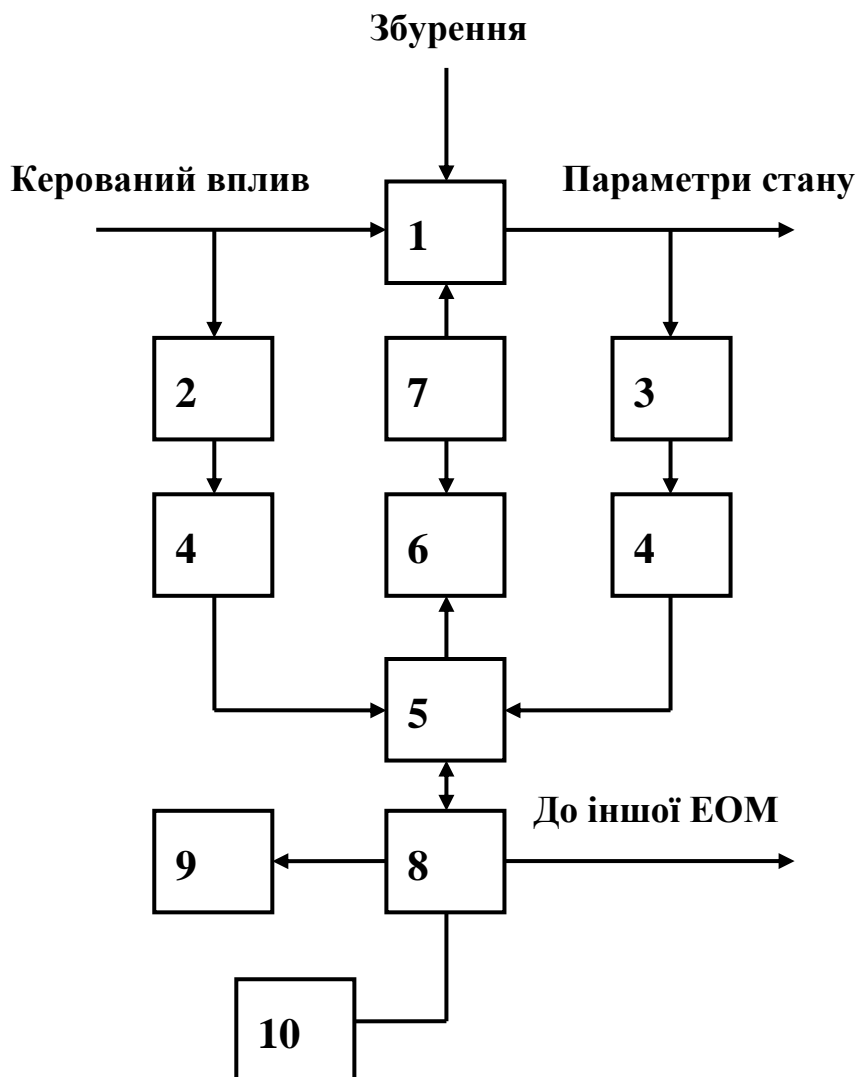
каналами зв'язку на базі інтерфейсів RS-485 та RS-232. Контролер має відкриту архітектуру та може бути запрограмованим, як за допомогою традиційних мов програмування (C, Асемблер), так і за допомогою мови логічного програмування у відповідності зі стандартом МЕК-61131 (у нашому прикладі підтримка ADAM-5510 реалізована в системі програмування Ultralogik ). Призначення і конфігурація системи. Автоматизована система повинна виконувати наступні технологічні задачі:

- оперативний контроль ( моніторинг) параметрів технологічного процесу випікання хлібобулочних виробів, які виникають за змінного режиму роботи тунельної печі ( температури, вологість середовища пекарської камери, час випікання, витрати газу тощо). Для цього в пекарській камері тунельної печі створюють кілька зон з різною температурою і вологістю середовища печі. З метою створення оптимального режиму роботи тунельної печі і забезпечення процесу випікання хліба оператор за допомогою мнемосхеми дисплея та клавіатури контролює температуру: зони зволоження тістової заготовки; зони інтенсивного нагрівання до температури 280-300 гр.С. в якій утворюється скоринка; зони утворення м'якушки при температурі 180-200.С. Тривалість випікання тістової заготовки 35-40хв. У нашому випадку цей параметр з високою точністю підлягає оптимізації, що дозволяє виконувати:

- автоматичне регулювання технологічних параметрів завантаження тістових заготовок, швидкості конвеєра, продуктивності, співвідношення витрат газу-повітря, температурних режимів роботи печі тощо);
- діагностику ( стану поверхні м'якушки хліба, конвеєрної стрічки, пристроїв завантаження-вивантаження, роботи повітряно-вентиляційних установок, CO2 тощо).

Система складається із робочих станцій різного функціонального призначення (рис.7.7), які об'єднані між собою локальною обчислювальною мережею АСУТП відділення випікання хлібобулочних виробів. Кожна із станцій передає інформацію про зміни технологічних параметрів з дискретністю 0,1с з іншими абонентами системи. Система мікропроцесорного керування передбачає регулювання параметрів та режимів роботи печі ПХС-25 тунельного типу, а саме: контроль і регулювання температури пекарської камери; контроль температури топкових газів; контроль та регулювання тисків та витрат газів, що надходять у камеру згорання; сигналізація про кількісні параметри тістових заготовок і візуалізація за допомогою комп'ютерного зору процесу їх завантаження, регулювання параметрів зволоження та керування конвеєром. Розробниками системи керування дільницею випікання хліба реалізовано обмін інформацією інженерних станцій з верхнім рівнем управління АСУ-АСУТП хлібозаводу. Інженерні станції потрібні для технічного обслуговування, реконфігурування та діагностики системи. При цьому використана операційна система Windows мови програмування BorlandC++ 5.0 та Delphi 2.0. Станція авторегулювання ( одна на кожен тунельну піч) виконує цифрове автоматичне регулювання основних технологічних параметрів та процесів ( температури в камері тунельної печі, витрат газу, форми хліба, кольору скоринки і т.п.). Проєктантами використана система

реального часу ОС-9 ( мова програмування Ultralogik ). Інженерна робоча станція представляє собою повномасштабну станцію ( ПЕОМ Pentium 100 /16 /1000 ), яка дозволяє у повному об'ємі виконувати усі функції технолога-оператора. Крім цього вона виконує введення системних і технологічних протоколів, архівування історії процесу. обмін інформацією МЕС з АСУ-АСУТП, санкційовану модифікацію баз даних ( вставок, параметрів налагодження регуляторів, конфігурація системи керування параметрами якості, охолодження, упакування, система паролей тощо) та мнемосхем. *Розглянемо приклад проектування мікропроцесорної системи керування тістомісильної машини дільниці підготовки безопарного тіста на базі Мікро-ЕОМ.* На рис. 7.7 наведена блок - схема системи керування тістомісильним апаратом за допомогою Мікро-ЕОМ.



**Рисунок 7.7. – Структурна схема мікропроцесорної системи керування з мікро-ЕОМ:**

1 – технологічний об'єкт керування (ОК); 2 – вимірювальні перетворювачі управлінських впливів; 3 – вимірювальні перетворювачі вихідних параметрів (ОК); 4 – вимірювальні контролери; 5 – управлінська мікро-ЕОМ; 6 – інтерфейсні блоки зв'язку з об'єктом; 7 – виконавчий механізм; 8, 9 – порти I, II; 10 – пульт оператора

До системи керування віднесені наступні елементи: 1- технологічний об'єкт керування; 2- вимірювальні перетворювачі керованих впливів; 3.- вимірювальні перетворювачі вихідних параметрів ОК; 4.- вимірювальні контролери; 5- управлінська Мікро-ЕОМ; 6.-інтерфейсні блоки зв'язку з об'єктом; 7- виконавчий механізм ; 8- внутрішні шини керування; 9.-блок пам'яті; 10- пульт оператора. Мікро - ЕОМ - це компактний пристрій на базі мікропроцесора, який має блок пам'яті, систему введення-виведення та спряження. Мікропроцесор повинен працювати з агрегатом і системою керування порційним замісом тіста, який виробляє порції тіста за експресною технологією з використанням концентрованих молочнокислих заквасок. Об'єкти керування - тістомісильна машина періодичної дії з інтенсивним механічним обробленням тіста, порційний автоматичний дозатор борошна з цифровим указником, комплекс дозаторів об'ємної дії з регульованим приводом за схемою АД -ТПЧ на кожному із інгредієнтів.

Безопарним способом замішують тісто з усієї кількості борошна, води, солі і дріжджів, Початкова температура його бродіння 28-30С, тривалість бродіння 2-4 год. Використання висококісотної, власне консервованої закваски з інтенсивним замісом забезпечує виробництво високоякісних хлібобулочних виробів. при значному зниженні витрат сухих речовин борошна в процесі бродіння і скорочення часу приготування тіста. Контроль параметрів борошна, витрат інгредієнтів виконує Мікро-ЕОМ шляхом обміну сигналами з ОК (вимірювальні контролери та інтерфейсні блоки зв'язку).

Алгоритми керування реалізовані у вигляді програм, які зберігаються у пам'яті ЕОМ. Інтерфейсні блоки слугують для зв'язку ЕОМ з ОК (з виконавчими механізмами та регулюючими пристроями) і периферійним обладнанням (з пультом оператора, дисплеєм). Пульт оператора використовують для керування роботою Мікро-ЕОМ з дисплеєм – для надання оператору інформації про стан обладнання, контрольовані параметри та інші характеристики автоматизованого виробництва тіста. Збирання і перетворення аналогових сигналів у цифрову форму про хід технологічного процесу, які надходять від різного роду датчиків та цифрової інформації виконується вимірювальними контролерами.

До складу інтерфейсних блоків зв'язку і контролерів можуть входити мікропроцесори, які виконують ті операції щодо введення-виведення та попереднього оброблення інформації, які зазвичай виконує центральний процесор. Мікропроцесори використані в наступних локальних системах відділення приготування тіста: автоматичного керування витратами борошна, води, інгредієнтів, автоматичного контролю якості тістових напівфабрикатів з функцією комп'ютерного зору та систем керування робототехнологічними інтенсифікаторами, системи автоматичного керування процесами заморожування напівфабрикатів. Автоматичне керування витратами води, інгредієнтів виконується наступним чином: на основі цифрових сигналів інтелектуальних датчиків витрат борошна і води, інгредієнтів, які надходять в тістомісильний апарат і сигналів датчиків густини тіста та його запаху відпрацьовується адаптивний алгоритм регулювання продуктивності

виробництва тістових заготовок за період  $T_z$ . У цьому випадку, наприклад контролер САР витрат води в тістомісильний апарат формує імпульсний командний сигнал на ВМ, який за рахунок зміни прохідного перетину збільшує або зменшує витрати води, яка надходить в апарат. Довжина командного імпульсу пропорційна параметру відхилення поточного значення питомих витрат густини тіста від заданого значення.

До складу системи адаптивного керування густиною тіста віднесені: перепрограмований мікропроцесорний контролер, таймер, мікропроцесор, постійний запам'ятовувальний пристрій (ПЗП), панель індикації, контролер і поле клавіатури та блок живлення. Діапазон регулювання інгредієнтів залежить від заданих параметрів хлібобулочних виробів, які забезпечує мікропроцесорний контролер САК витрат інгредієнтів в трьох режимах: програмування, роботи і діагностики. У режимі програмування технолог-оператор за допомогою клавіатури може вводити технологічні параметри тістомісильного агрегату (робочі характеристики густини тіста його температурні режими, тип і число інгредієнтів їх витрати) в залежності від параметрів сили борошна. Введені дані та завдання візуалізуються на панелі цифрової індикації, при цьому автоматично перевіряється процес виконання стабілізації заданої норми витрат інгредієнтів в залежності від густини та запаху тіста. Адаптери Мікро-ЕОМ зовнішнього інтерфейсу забезпечують 64-канали зв'язку зі зовнішніми пристроями МП, який має кварцовий генератор тактових сигналів та програмований таймер для синтезу необхідних системі керування часових інтервалів спостереження. Крім цього МП САК витрат інгредієнтів виконує функцію корекції частоти обертання АД - приводу мішалки тістомісильного апарату за інформацією індуктивних датчиків положення та обертання. Панель керування та індикація з відповідними схемами формування сигналів має клавіатуру та дисплей із рідинних кристалів, на якому може ініціалізуватись повідомлення у цифровій формі та у вигляді вказівок (надписів), піктограм робочих органів (у відповідності з символами, розташованих на кнопках клавіатури). Мікроконтролер може також реалізувати різні програми щодо команд керування тістомісильним апаратом, які введені з клавіатури. Наприклад, команда «тест» запускає програму діагностики стану робочих характеристик процесу приготування молочнокислої закваски та тіста з заданими параметрами якості, роботи приводів насосів та технологічного апарату й дільниці в цілому. При цьому може виконуватись цифрова індикація стану їх кінематичних режимів. Частоту обертання насосів та робочих органів тістомісильного апарату, виміряних в режимі х. х., контролер введе в пам'ять Мікро-ЕОМ. У подальшому, з врахуванням реальної частоти обертання валу АД-приводів насосів, сигналів датчиків вібрації МП формує сигнали технолог-оператору про порушення режимів роботи насосів, ВМ шнекових давальників завантаження борошна, витрат води й інгредієнтів. Команди «ПУСК» і «СТОП» відповідно запускають та зупиняють програму контролю робочих органів насосів, й АД в процесі виконання технологічних процесів. Команда «СОР» запускає програму корекції системи автоматичного керування швидкістю конвеєра холодильної установки (КХУ). Команда «АРЗ»

( автоматичне регулювання завантаження) запускає програму формування сигналу рівня завантаження КХУ. Сигнал формується контролером на основі інформації про частоту обертання валу двигуна холодильного конвеєра, сигналу датчика потужності АД, температурних режимів роботи холодильної камери, кількісних параметрів хліба на конвеєрній стрічки тощо. Цей сигнал надходить в систему МП - керування тиристорним перетворювачем частоти АД-ТПЧ, який змінює швидкість поступового руху КХУ, при відхилення значення сигналу керування завантаженням конвеєрної стрічки від заданого. Візуальний контроль за станом технологічного процесу виробництва тіста й тістових заморожуваних напівфабрикатів здійснюється за допомогою відеокадрів на екрані дисплея Мікро - ЕОМ у вигляді мнемосхем, графіків, гістограм, відхилень значень параметрів технологічного процесу від норми тощо. За кольоровими мнемосхемами технолог – оператор, спостерігаючи за зміною технологічних параметрів у вигляді цифрової інформації або стовпчастих діаграм, приймає рішення щодо оптимального керування тістомісильним відділенням. У разі виникнення перед аварійної або аварійної ситуації на дисплеї змінюється режим індикації параметрів чи колір відображення або відображення починає миготіти, то оператор - технолог приймає рішення щодо визначення алгоритму оцінки виробничої ситуації та переведення системи до стабілізації параметрів виробництва продукції. За потреби може вмикатися звуковий сигнал для технолога – оператора, а також йому надаються рекомендації щодо виведення із аварійного режиму, що супроводжується появою на екрані пояснювальної текстової інформації. В цьому випадку технолог - оператор за допомогою клавіатури або сенсорного екрану може втручатись в режими роботи тістомісильної машини, змінюючи завдання, чи параметри налаштування регуляторів продуктивності опарних насосів, продуктивності шнекових давальників, витрат води та інгредієнтів або дистанційно керувати ВМ. Технолог - оператор може скористатись режимом перегляду передісторії виведення технологічного режиму на номінальні показники, проаналізувавши зміну параметрів густини тіста його запах в реальному масштабі часу та сили борошна, його вологу тощо. Перейдемо до вивчення методів проєктування розподілених систем керування технологічними процесами виробництва смарт - продуктів харчування.

#### **7.4. Розподіленні системи керування**

Розподіленою системою керування (РСК –DCS- DistributedControlSystem) називають велику систему керування складними технологічними процесами виробництва смарт - продуктів харчування, в яких система цифрового керування об'єктом має ієрархічну структуру та представляє комплекс підсистем керування різних рангів з ЕОМ і високим рівнем інформаційного забезпечення, засобів адаптації, самоорганізації, прийняття рішень на основі експертних оцінок та нечіткого оцінювання виробничих ситуацій й бізнес процесів. При цьому до складу автоматизованої системи керування технологічними процесами виробництва відносять універсальні

мікропроцесорні системи (64-розрядні Pentium – верхній рівень ERP - управління, 32- розрядні Мікро –ЕОМ середній рівень MES- рівня керування), 16- розрядні МП нижній рівень керування локальними системами. До складу системи завжди входять контролери, плати і модулі введення- виведення, мережеве обладнання, робочі станції, програмне забезпечення.

РСК використовують для керування безперервними технологічними процесами, які виробляють продукцію в твердому або рідкому стані (наприклад, виробництво борошна. пива тощо) та дискретних процесів (наприклад, виробництво хлібобулочних виробів, кондитерських тощо), а також безперервно-дискретних процесів, які поєднують ці режими (виробництво молочних продуктів тощо). Експерти рекомендують використовувати розподілені системи керування при проектуванні багаторівневих системах керування процесами виробництва продуктів харчування.

Вимоги до РСК серед них:

1) Відмовостійкість, Для РСК відмов, а відповідно зупинок не повинно бути. Це досягається за рахунок резервування, використання компонентів підвищеної надійності, впровадження сучасних засобів діагностики, а також за рахунок ТО і безперервного контролю з боку людини;

2) Масштабність РСК, розподілена система керування повинна бути універсальною як для окремої дільниці, так і для всього підприємства;

3) Простота розробки та конфігурація. Система повинна мати значний вибір програмних компонентів і засобів розробки, а саме пакети візуального програмування, графічні бібліотеки, функціональні блоки, переналагоджувальні мережеві протоколи. Одним із головних принципів побудови РСК- єдина конфігураційна база системи. Зміни, виконані в одному програмному модулі системи, повинні автоматично віддзеркалюватись у всіх залежних модулях. Функціонально РСУ відрізняється від систем ПЛК + SCADA (PLC+ SCADA) наступним:

1) База даних розподілена між контролерами, але є єдиною. Саме ця властивість і заложена у назві «РСК»;

2) Операторський інтерфейс тісно інтегрований в систему;

3) Інтенсивне і широке оброблення тривог (алармів) та подій; 4)

Можливість вести розробку конфігурації і вносити зміни он-лайн ( тобто не зупиняти процес керування);

5) Можливість змінювати обладнання та розширювати систему (додавати нові вузли і плати) без відключення живлення;

6) Глибока діагностика від рівня операторського інтерфейсу до окремого каналу введення - виведення без будь-якого налагодження;

7) Можливість резервування будь-якого компонента системи (контролер, модуль введення - виведення, операторські станції) на апаратному рівні і без будь-якого налагодження ПЗ.

Компанії виробники РСК (DCS) Foxboro(I/A Series), Honeywell Fisher-Rosemount (Delta-V), ABB(Symphony), Yokodawa (Centum XL), Valmet (Dimatic). В станції керування можуть бути зареєстровані плати CPU, зовнішні інтерфейси мережі, інтерфейсні плати, шина Rio і внутрішня шина вузла. Є

моделі з резервним джерелом живлення. На кожній процесорній платі знаходиться два процесора. Кожний процесор виконує одні і ті ж управлінські обчислення, а результати розрахунків порівнюються між собою. Якщо результати узгоджені, то вони передаються в пам'ять і на інтерфейсну плату шини. У випадку, коли результати роботи процесорів не співпадають, то пристрій порівняння (компаратор) сприймає це, як нештатну ситуацію і переключається на резервну плату. Резервна процесорна плата виконує ті ж самі розрахунки, що і основна плата. При перемиканні її в активний стан обчислення на ній результати передаються на інтерфейсну шину без переривання процесу керування. При визначенні помилки стану CPU виконується самодіагностика плати і, якщо апаратні засоби в нормі, то плата повертається із нештатного стану в резервний. В системах керування технологічними процесами виробництва продуктів харчування на обладнанні, яке виробляють заводи ФРН використовують системи автоматизованого керування спроєктовані на базі РСК Simatic PCS7 фірми Siemens. Система має класичну трьохрівневу архітектуру, характерну для класу DCS. На верхньому рівні розташовані операторські станції, сервери, інженерні станції тощо.

У загальному випадку до складу верхнього рівня управління можуть входити:

- операторські станції (ОС-клієнти), реалізують людино-машинний інтерфейс (ЛМІ);

- сервери (ОС-сервери), реалізують зв'язок між операторськими станціями та контролерами. Вони займаються архівуванням та опційно резервуються;

- інженерні станції, необхідні для технічного обслуговування, реконфігурування та діагностики системи;

- сервери CAS (centralarchiveservers) можуть включатись до складу системи для термінованого збереження історії у вигляді бази даних SGL, опційно резервуються;

- сервери WebNavigator використовуються для надання доступу до технічних даних і архіву через Web – інтерфейс.

Система виконує підтримку до 50 віддалених клієнтів;

- сервери Batch використовується для рецептурного керування процесом. Вони також опційно резервуються;

- сервери RouteControl використовуються для керування транспортуванням продукту по розгалуженій системі технологічних маршрутів. Вони також опційно резервуються;

- сервери OPC потрібні для доступу до реальних технологічних даних і архівів за допомогою одноіменного протоколу.

Перейдемо до узгодження роботи мікропроцесорних систем нижнього рівня з 32-розрядними RISM-процесорами. Більшість периферійних контролерів є 8-розрядними, в той же час як більшість операцій в RISM-процесорі виконуються з 32-розрядними словами. Наприклад, система, яка спроєктована на базі R3000 RISC- процесора і периферійного контролера 5380 з повним набором команд.

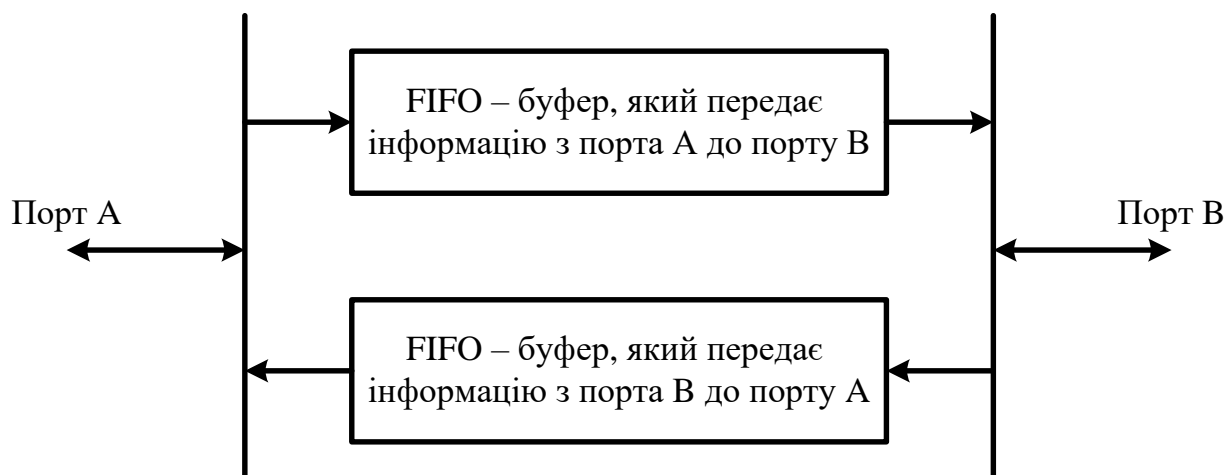
Систему можна розділити на 3 основні блоки: процесор, інтерфейс з



пам'яттю і периферійний контролер. Процесорний чіп R3000 складається із командної кеш-пам'яті, інформаційної кеш-пам'яті, пристроїв ініціалізації стану та декількох ключів. Для встановлення в початковий стан системи використовують 6 пристроїв ініціалізації. Саме вони встановлюють систему в початковий стан, синхронізуючись командою RESET або 6 апаратними переривачами. Інтерфейс-процесор-периферія дуже складний, а тому в процесі передачі інформації між процесором та контролером можлива її втрата за рахунок зависання процесора. Швидкодія при переході від 32-розрядного процесора до 8-розрядного зменшується в 4 рази. Для скорочення інформації основного процесора необхідно її стиснути та виконати спеціальне кодування буферних даних. Інформаційний обмін між процесором і периферією виконується за принципом: « перший зайшов - перший вийде » FIFO.

Така пам'ять є великим загальним інформаційним буфером, який використовується для швидкісного інформаційного обміну каналів. Чипи FIFO-буферів зручні для використання в RISC-системах в зв'язку з тим, що вони можуть асинхронно об'єднувати і розподіляти інформацію між процесорами. Сучасні двонаправлені буфери дозволяють узгодити обмін між процесором та периферією. Такий буфер має 2 інформаційних порти і два FIFO-буфера для інформації, яка передається в двох напрямках.

На рис.7.8 наведена схема такого обміну. Двонаправлений буфер вирішує питання обміну між процесорами з різною швидкістю, але не вирішує питання обміну між процесорами з різною розрядністю. Для того щоб з'єднати 32-розрядний RISC –процесор з 8-розрядним периферійним контролером необхідно перетворити інформацію у відповідні формати.



**Рисунок 7.8. – Схема обміну інформацією з двонаправленим буфером**

Мультиплексор перетворює кожне 32-розрядне слово в 4байта при цьому пропускна спроможність збільшується в 4рази. Крім цього, мультиплексор сортує вихідну інформацію від старших байтів до молодших, або навпаки. Це дозволяє узгоджувати різні периферійні контролери з RISC- процесорами. Інформаційний селектор виконує перетворення 8-розрядної інформації в 32-розрядну вибором однієї із чотирьох позицій в кожному 32-розрядному слові

для кожного наступного байта. Повне 32-розрядне слово може бути розміщене в FIFO-буфер. Також як і мультиплексор, інформаційний селектор виконує сортування інформації від старших розрядів до молодших, або навпаки. Більшість периферійних пристроїв використовують кодування інформації для визначення і корекції помилок. Інформаційні помилки є випадковими, а тому кодування інформації забезпечує захист від помилок в периферійному контролері. Таким чином, інформаційний обмін між RISC- процесором та периферією через двонаправлений буфер може також забезпечити контроль помилок. Інтерфейсний блок між процесором і двонаправленим FIFO-буфером має буфер запису, буфер читання і пристрій ініціалізації стану. Для своєї роботи головний процесор використовує кеш-пам'ять. З метою забезпечення інформаційної стабільності вся інформація може бути записана в зовнішньому ОЗП. Узгодження швидкісної процесорної шини (200Мбайт) і повільної (10-40Мбайт) вимагає синхронізуючого буфера. З метою забезпечення керування буферизацією буфер запису одержує адреси та інформацію від основного процесора. Таким же чином буфер читання переносить інформацію із зовнішнього ОЗП в кеш-пам'ять, коли виникає пропуск інформації при її обміні. В цьому випадку використовується синхронізуючий пристрій для синхронізації роботи зовнішнього ОЗП і швидкодіючої шини головного процесора. Периферійний контролер ініціалізує 8-розрядний обмін периферійної інформаційної шини (має 16 розрядів) та процесора з швидкодією більше 4Мбайт/с. Одним із поширених контролерів в системах керування для периферійних пристроїв персональних комп'ютерів та АРМ є контролер 5380, який має стандартний 8-розрядний інтерфейс процесор-периферія та стандартний SCSI порт, Особливостями інтерфесу процесор-периферія є 8-розрядна шина, стандартний набір команд і можливість керування прямим доступом до пам'яті. Відзнакою SCSI порту є 8-розрядна керувальна та інформаційна шини. Швидкодія периферійної шини обмежена 1,5-4Мбайт/с, а інформація по інформаційній шині передається швидше ніж 10-40Мбайт/с. Така різниця в швидкодії потребує буферизацію інформаційних потоків. Незважаючи на те, що чіп 5380 має керування прямим доступом в пам'ять, все ж йому необхідний також і FIFO –буфер для зменшення зупинок головного процесора в процесі передачі інформації в периферійні пристрої. Таким чином, будемо рекомендувати також метод узгодження RISC- контролера та SCSI-периферії у вигляді схеми включення контролера 5380 з керуванням прямим доступом до пам'яті між процесором та периферією.

Мережі верхнього рівня, як за правило, можуть також бути спроектованими на базі промислових комутаторів Siemens серії Scalange.

У загальному вигляді в мережах PCS-7 існує дві можливі схеми побудови верхнього рівня:

- класична схема «клієнт-сервер»;
- одиночні станції.

Перший варіант полягає в тому, що в системі виділяють загальний сервер, який з одного боку спілкується відімкненими до нього контролерами, а з іншого боку- поставляє технологічні дані операторським станціям та іншим

клієнтам. Цей варіант раціональний, коли клієнтів множина, а комунікаційне навантаження на контролери з боку верхнього рівня є помірним. Інший варіант використовує пряме підключення станцій до контролерів, що економічно підходить до невеликих систем управління, для яких наявність сервера- значні кошти.

Сервер- виконує функції стиснення інформації, їх збереження в системі файлів та швидкого пошуку. Можуть зберігатись дані типу float 16, float132, int16, int32, digital, string, blod. Дані, які надійшли з інтерфейсу, надходять до випадкового буфера збереження даних РЧ (SnapShot), із яких вони пересилаються в основний архів. Числові дані перед записом в архів стискаються. Алгоритм стиснення, який використовується називається «swingingdoor» ( принцип обернених дверей), ідея якого полягає в побудові кусково- лінійної апроксимації функції часового тренду. Нове значення параметру записується з міткою часу в архів лише у випадку, якщо воно визначає крапку залому відрізка прямої, яка наближає тренд параметра зі заданою точністю. У випадку, коли цей відрізок може бути продовженим новою крапкою без втрати точності, то попередня крапка відкидається та замінюється в тимчасовому архіві наступною. Параметр стиснення на сервері називається «compressiontest» ( поріг стиснення). Зазвичай він значно ( у два рази) є більшим, ніж поріг подій для інтерфейсу.

Фірма Siemens пропонує ряд новітніх системних мікропроцесорів серед них:

- SimaticS7-1200, який через мережу Industrial Ethernet/ Profinet, Profibus, а також Ptp ( point- to- point) може з'єднуватись з іншими МП;

- SimaticET-200SP- це універсальна багатофункціональна станція нового покоління з метою побудови систем розподіленого введення- виведення на основі мереж Profinet і Profibus.

Панелі оператора SimaticHMI– використовуються з SimaticS7, призначені для рішення задач оперативного керування та моніторингу на рівні окремого обладнання та дільниць виробництва продукції.

### ***Контрольні запитання***

- 1. Наведіть основні характеристики мікропроцесора.*
- 2. Поясніть структуру 32-розрядного універсального мікропроцесора.*
- 3. Вкажіть відмінність між мікропроцесором(МП), мікропроцесорною системою (МПС), мікроконтролером (МК) і мікро-ЕОМ.*
- 4. Переваги ПЛК( програмованих логічних контролерів) порівняно з просто контролерами Сфери застосування ПЛК.*
- 5. Типова архітектура програмованих логічних контролерів.*
- 6. Назвіть основні напрями розвитку МП. в харчовій галузі.*
- 7. Схарактеризуйте мікропроцесорні комплекси та РСК в харчовій промисловості.*
- 8. Дайте визначення системи «клієнт-сервер».*
- 9. Основні характеристики комп'ютерно-інтегрованих виробництв в харчовій промисловості.*

## Тема 8. Основи теорії нечітких множин

### 8.1. Теоретичні основи нечіткого керування

У теорії звичайних множин введено поняття множин як сукупності або набору елементів, які характеризуються заданими властивостями.

Такими елементами можуть бути цілі числа, технологічні параметри, економічні та фінансові чинники, які впливають на якість продукції; терміни, за допомогою яких характеризують динаміку змін деяких параметрів; В подальшому множину будемо позначати великими літерами, а його елементи – малими.

Належність елемента  $X$  множині  $A$  позначимо так  $X \in A$ . Якщо елемент  $X$  не належить множині  $A$ , то пишемо  $X \notin A$ . Множину, яка не має жодного елемента, називають пустою і позначають  $\emptyset$ .

Для позначення того факту, що елемент  $X$  може належати або не належати множині  $A$ , вводиться поняття характеристичного числа, яке будемо називати індикатором, тобто

$$X_A = \begin{cases} 1, & \text{якщо } X \in A \\ 0, & \text{якщо } X \notin A \end{cases} \quad (8.1)$$

При такому підході виконується чітка, однозначна класифікація елемента  $X$  на належність його до множини  $A$ .

Інколи вводять до розгляду поняття універсальної множини  $U$ . Під універсальною множиною розуміють область суджень або (у випадку, коли розглядається який-небудь технологічний параметр, економічний або фінансовий, тощо) діапазон, в якому може знаходитись величина цього параметра. Наприклад, якщо ми вивчаємо параметри енерговитрат, і проведення спеціальних вимірів потужності електроенергії в технологічних лініях підприємства харчової промисловості відомо, що її величина лежить в інтервалі  $[E_1, E_2]$ , то в якості універсальної множини приймають цей діапазон.

У випадку, коли будемо розглядати кінцеве число елементів множини  $A$ , його записують у вигляді  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ .

У теорії нечітких множин допускається наступна форма запису:

$$A = a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n \text{ або } A = \bigcup_{i=1}^n a_i, \quad (8.2)$$

де знак  $\cup$  – показує об'єднання елементів  $a_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) в одну множину  $A$ .

Якщо ми вимірюємо потужність технологічного апарату в діапазоні  $[0, 10 \text{ кВт}]$  і, якщо взяти за крок квантування  $1 \text{ кВт}$ , то універсальну множину представимо у вигляді:

$$P = A = \{0 + 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7 + 8 + 9 + 10\}.$$

Еквівалентна, але більш розповсюджена форма запису має вид:

$$P = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}.$$

Таким чином, використовуючи поняття універсальної множини ми показали, що є класифікація значень потужності, що належить множині  $A = P$ , в якому включені лише елементи із діапазону  $[0, 10 \text{ кВт}]$ .

Але на практиці не завжди в усіх випадках ми можемо виконати таку класифікацію. Так, наприклад, коли виміри технологічних параметрів не можливо виконати, наприклад, виміри результатів густини тіста, і при збільшенні їх у визначеному діапазоні не можливо віднести ці параметри до множини А. Аналогічна ситуація може виникнути при класифікації продукції, яку виробляє підприємство по категорії якості.

Для формалізації такої інформації корисні наступні узагальнені поняття множин [13,27,31].

Розглянемо деякі визначення:

Визначення 1. Нечітка підмножина В універсальної множини  $U = A$  характеризується функцією належності  $\mu_A:U \rightarrow [0,1]$ , яка ставить у відповідності кожному елементу  $u \in U$  число  $\mu_A$  із інтервалу  $[0,1]$ , що характеризує ступінь належності елемента  $u$  підмножині В.

Форма запису нечіткої підмножини В універсальної підмножини  $U=A$  має вид:

$$B = \mu_1 / u_1 + \mu_2 / u_2 + \dots + \mu_n / u_n \text{ або } A = \bigcup_{i=1}^n \mu_i / u_i, \quad (8.3)$$

де  $\mu_i$  – ступінь належності елемента  $u_i \in U (i = \overline{1, n})$  нечіткій підмножині В універсальної множини  $U$ ;

знак суми визначає об'єднання однокрапкових множин  $\mu_i / u_i$ ;

риска відділяє ступінь належності від елемента  $u_i \in U (i = \overline{1, n})$ .

У випадку, якщо  $\mu_i$  задано непрививною функцією, нечітка підмножина В універсальної множини  $U = A$  може бути представлена у вигляді:

$$A = \int_U \mu_A(u) / u, \quad (8.4)$$

де знак інтегрування визначає операцію об'єднання однокрапкових множин  $\mu_A(u) / u$ .

Приведене визначення дає змогу формалізувати різного виду невизначеності, що дає змогу експертним методом дати оцінку стану технологічного процесу шляхом введення термінів:

$A_1 \triangleq$  високий;

$A_2 \triangleq$  низький;

$A_2^2 \triangleq$  дуже низький;

$A_1^2 \triangleq$  дуже високий;

$(A_1^2)^2 \triangleq$  дуже-дуже високий;

$\neg(A_1^2) \triangleq$  не дуже-дуже високий – якщо використовувати операцію нечітких підмножин;

$\neg(A_2^2) \triangleq$  не дуже-дуже низький – якщо також використовувати операцію нечітких підмножин.

елементів

$u \in U = A$  нечіткій підмножини не зміниться.

Це правило дає змогу рішення конкретних задач в в деякій вибраній раніш множині, а результат перевести в область величин вимірювання параметрів управлінської виробничої системи (УВС) підприємства. Крім цього важливого правила, поняття нечіткої множини є узагальненим поняттям

звичайної множини, що дає змогу провести аналогію і виділити різницю між теорією ймовірності і теорією нечітких множин [27,31,36,].

Розглянемо ще одне правило. Якщо для параметрів, що можуть бути розраховані або виміряні відома умовна ймовірність переходу управлінської виробничої ситуації (УВС) від допустимих станів ( $X \geq X\alpha$ ) до недопустимих ( $X < X\alpha$ ) то функція належності, що характеризує ступінь ризику від наслідків рішень які приймає технолог (в подальшому людина, що приймає рішення – ЛПР), може бути визначена із умови переваг тих станів, для яких ступень ризиків менша.

Нехай при виборі рішення щодо покращення функціонування процесу виробництва продуктів здорового харчування розглядають дві альтернативи:  $X_1$  і  $X_2$  причому  $X_1$  має більше переваг, ніж  $X_2$ . Цю умову запишемо так:

$$X_1 > X_2 \Leftrightarrow [1 - P(X\alpha \leq X_1)] \geq [1 - P(X\alpha \leq X_2)] \quad (17.5)$$

Тоді в якості функції степені належності приймають [2].

$$\mu(X\alpha) = [1 - P(X \leq X\alpha)] \quad (8.6)$$

При заданій функції належності об'єднання нечітких множин  $A$  і  $B$  в  $X$  через алгебраїчну суму їх функцій ступеня належності буде виконуватись наступним чином:

$$\mu_{A \cup B}(X) = \begin{cases} 1 & \text{при } \mu_A(X) + \mu_B(X) \geq 1 \\ \mu_A(X) + \mu_B(X) & \text{в протилежному випадку} \end{cases} \quad (8.7)$$

При цьому відмітимо аналогію визначення ймовірності суми незалежних випадкових явищ  $A$  і  $B$ .

Якщо функцією належності пересічення нечітких множин є  $A$  і  $B$  та виникають одночасно два незалежних явища  $A$  і  $B$ , тобто:

$$\mu(X) = \min \{ \mu_A(X), \mu_B(X) \}; \quad (8.8)$$

$$\forall X \in X$$

Тобто  $A \cap B$  – нечітка множина, яка є пересіченням двох нечітких множин  $A, B$ .

Тоді алгебраїчний добуток їх функцій належності буде таким:

$$\mu_{A \cap B}(X) = \mu_A(X) \cdot \mu_B(X) \quad \forall X \in X, \quad (8.9)$$

а при належності явищ  $A$  і  $B$  співвідношення (8.8) співпадає із визначенням ймовірності добутку явищ.

У двох останніх випадках функції належності задаються через ймовірність суми і добутку незалежних випадкових явищ.

Важливо також відмітити різницю запропонованих в [2,36] співвідношень для визначення функції належності об'єднання (8.5) і пересічення (8.8) нечітких множин від співвідношень (8.7) і (8.8):

$$\mu_{A \cup B}(X) = \max \{ \mu_A(X), \mu_B(X) \} \quad \forall X \in X \quad (8.10)$$

Інтерпретація останнього – це  $A \cup B$  – нечітка множина, що представляє об'єднання двох нечітких множин  $A$  і  $B$ . При цьому настає одне із явищ  $A$  або  $B$ .

Якщо  $B \subseteq A$ , тобто  $\mu_B(X) \leq \mu_A(X), \forall X \in X$ , то функція належності  $\mu_{A \cap B}, \mu_{A \cup B}$

(X) у співвідношеннях (8.5), (8.7) завжди залежить лише від однієї з функцій  $\mu_A(X)$ ,  $\mu_B(X)$  при випадковому значенні іншої.

При обчислюванні об'єднання і пересічення нечітких множин у відповідності із виразами (8.6), (8.8) на функції  $\mu_{A \cup B}(X)$  і  $\mu_{A \cap B}(X)$  здійснюють вплив дві функції  $\mu_A(X)$  і  $\mu_B(X)$ .

Для того, щоб задати оцінки ймовірності і нечіткості будемо використовувати один і той самий числовий інтервал  $[0,1]$ , який характеризує

можливі ступені нечіткості і ймовірності із-за невизначеності стану управлінських виробничих ситуацій (УВС).

Розглянуті вище теоретичні аспекти дозволяють перейти до практичного використання теорії нечітких множин при побудові підсистем інформаційного забезпечення підприємств та управління складними технологічними процесами харчових технологій.

## ***8.2. Теоретичні основи побудови нечітких систем автоматизованого управління підприємствами в харчовій промисловості***

Складними процесами виробництва продуктів харчування керують люди – технологи, які приймають рішення (ОПР), або за рахунок систем автоматизованого управління (АСУ) на основі інформації, що (вони технологи – ОПР) одержують про показники технологічного процесу. Ця інформація має нечіткий або розмитий характер і виникає із наступного аналізу:

По–перше, моделі, які використовуються для прийняття рішень не є адекватними реальним системам, тому що вони побудовані в умовах нечіткої інформації.

По–друге, параметри моделей також побудовані на основі спрощень і допущень інтуїції експертів або технічного персоналу.

По–третє, цільові функції в багатьох випадках виражаються на основі нечітких відношень – припущень або переваг.

В сучасній теорії управління є дуже сильний математичний апарат, який використовують для обробки нечіткої інформації – це теорія нечітких множин Л. А. Заде [2,3,8,10,27]. Крім цього в теорії управління за останні п'ятнадцять років виконана дослідниками значна кількість робіт, яка пов'язана з проблемами зв'язку між такими категоріями як невизначеність, як нечітка випадковість, можливість, правдоподібність [1,2,8,16,17,27,31].

Ми в подальшому будемо розглядати лише ті положення, які потрібні для вивчення явищ розмитості інформації при проектуванні підсистем інформаційного забезпечення та диспетчерського управління підприємством харчової промисловості. Для практичних задач нами вже введено поняття лінгвістичної змінної, яка дозволяє виконувати зв'язок між кількісною і якісною інформацією. Лінгвістична змінна – це змінна, значеннями якої можуть бути як числа, так і слова і словосполучення мови. Значення лінгвістичної змінної виражається у вигляді нечіткої підмножини X.

Над нечіткими підмножинами можливо виконувати операції у відповідності з нечіткою логікою.

Приведемо основні операції нечіткої логіки.

Операція І (пересічення нечітких підмножин)

$$\mu_3(X) = \mu_1(X) \cap \mu_2(X) = \min \{ \mu_1(X), \mu_2(X) \}, \quad \forall X \in X$$

Операція АБО (об'єднання нечітких підмножин).

$$\mu_3(x) = \mu_1(x) \cup \mu_2(x) = \max \{ \mu_1(x), \mu_2(x) \}, \quad \forall X \in X$$

Операція НІ (нечітке заперечення)

$$\mu_3(x) = \overline{\mu}(x) = 1 - \mu(x), \quad \forall X \in X$$

Операція обмежений добуток

$$\mu_3(x) = \mu_1(x) \wedge \mu_2(x) = \max \{ 0, \mu_1(x) + \mu_2(x) - 1 \} \quad \forall X \in X$$

Операція обмежена

$$\mu_3(X) = \mu_1(X) \vee \mu_2(X) = \min \{ \mu_1(X) + \mu_2(X), 1 \}, \quad \forall X \in X$$

Операція алгебраїчний добуток

$$\mu_3(X) = \mu_1(X) \mu_2(X) \quad \forall X \in X$$

Операція алгебраїчна сума

$$\mu_3(X) = \mu_1(X) + \mu_2(X) = \mu_1(X) + \mu_2(X) - \mu_1(X) \mu_2(X) \quad \forall X \in X$$

Операція різниця

$$\mu_3(X) = \mu_1(X) - \mu_2(X) = \max \{ 0, \mu_1(X) - \mu_2(X) \}, \quad \forall X \in X$$

Операцію концентрування, можемо ідентифікувати так

$$\mu_3(X) = \mu_r(x), \quad \forall X \in X,$$

$r > 1$  – концентрування;

$r < 1$  – відповідає випадку розтягуванню функції належності.

В умовах оперативного контролю за роботою технологічних апаратів диспетчери – технологи одержують суб'єктивну нечітку інформацію про стан цих агрегатів в залежності від знань і досвіду роботи.

Важливим поняттям із теорії нечітких множин є “нечітке відношення”. Чітким відношенням  $R$  на непустій множині  $X$  називається підмножина множини  $X^n$ , тобто  $R \subseteq X^n$ . Якщо  $R$  –  $n$  - мірне співвідношення на  $X$  і  $(x_1, x_2, \dots, x_n) \in R$ , то тоді вважаю, що співвідношення  $R$  виконується для елементів  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

Якщо ж  $(x_1, x_2, \dots, x_n) \notin R$ , то будемо вважати, що співвідношення  $R$  не виконується для елементів  $x_1, \dots, x_n$ . Аналогічно з нечіткою підмножиною  $A$  множини  $X$ , яка визначається функціями приналежності  $\mu_A(x)$  елементів із  $x$  нечіткої підмножини  $A$ , нечітке співвідношення також визначається за допомогою відповідної функції приналежності:  $\mu_R(x): \mu_R: x_1 X \dots X x_n \rightarrow L$ . Тут символ  $X$  має сенс декартового добутку, а  $L$  – відрізок числової прямої  $[0,1]$ , або множина лінгвістичних змінних, множина дійсних чисел і т. п.

В більшості випадків під нечітким співвідношенням розуміють саму функцію  $R: x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \rightarrow L$ , де  $L = [0,1]$ . В якості прикладу наведемо бінарне нечітке співвідношення  $R: x \times Y \rightarrow [0,1]$ .

Нехай множина  $X$  і  $Y$  складається із трьох елементів  $X = \{x_1, x_2, x_3\}$ ,  $Y = \{y_1, y_2, y_3\}$ .



Тоді відношення R можливо задати матрицею співвідношення:

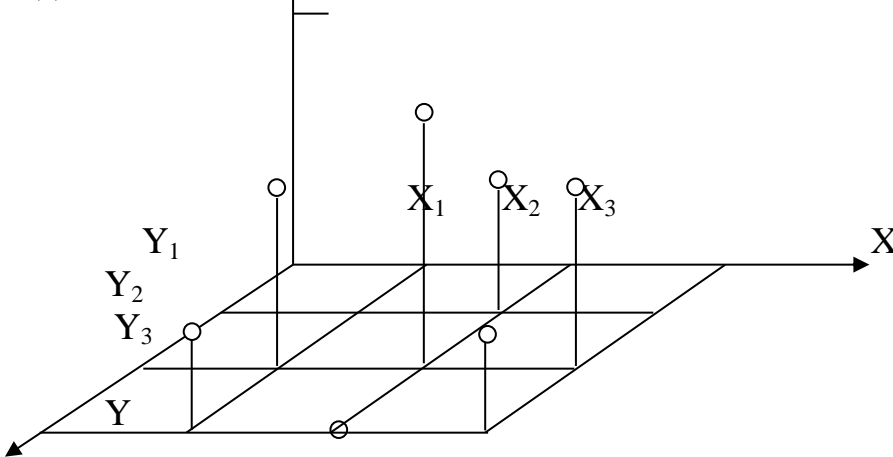
R	$y_1$	$y_2$	$y_3$
$x_1$	0	0,4	0,1
$x_2$	0,8	1	0,7
$x_3$	0,3	0	0,5

або у вигляді трьохмірного графіка (Рис.8.1.):

До нечітких співвідношень  $\mu_R$  можливо використовувати різні операції, такі як об'єднання перетинання, виділення найбільших і найменших елементів співвідношень. Утім найбільш важливою є операція композиції (O). Наступне співвідношення визначає операцію композиції нечітких відношень R і S. Будемо вважати, що R задано на множині X і Y, а S – на множині Y і Z. Тоді

$$(R \circ S)(x, z) = \bigvee_{y \in Y} (R(x, y) \wedge S(y, z)); \forall x \in X, \forall z \in Z, \quad (8.11)$$

де  $\bigvee_{y \in Y}$  визначає найменшу верхню межу множини елементів  $(R(x, y) \wedge S(y, z))$ , а  $y$  оббігає всі значення із Y. Відношення  $(R \circ S)$  є відношенням між X і Z.



**Рисунок 8.1 Трьохмірний графік співвідношення**

Практична цінність композиції нечітких співвідношень полягає в тому, що із її допомогою можливо ідентифікувати логічні конструкції виду “якщо..., то...”. Найбільш простим прикладом використання нечіткого відношення є опис функціонування об’єктів збагачувальної технології R, входом яких є значення деякої лінгвістичної змінної A, а виходом – значення деякої лінгвістичної змінної B. Нехай A приймає значення  $\{\mu_{A1}(x), \mu_{A2}(x), \mu_{A3}(x)\}$ , а B приймає наступні значення  $\{\mu_{B1}(y), \mu_{B2}(y), \mu_{B3}(y)\}$ , де і Y множини, на яких визначені нечіткі підмножини  $\mu_A, \mu_B$ , відповідно. Тоді для того, щоб визначити значення B, необхідно визначити композицію нечіткої підмножини X, діючої на вході об’єкту, і співвідношення R, тобто  $\mu_B(y) = \mu_A(x) \circ R(x, y) = \mu_A(x) \circ \mu_R(x, y)$ . Якщо розписати операцію композиції через операції логіки I та АБО, тоді отримуємо:

$$\mu_B(y) = \bigvee_{x \in X} (\mu_A(x) \wedge \mu_R(x, y)) = \max_{x \in X} \left( \min_{y \in Y} \{\mu_A(x), \mu_R(x, y)\} \right) \quad (8.12)$$

Наведені співвідношення дозволяють моделювати об’єкти виробничих

процесів харчових технологій, які характеризуються невизначеністю вхідних, вихідних величин, а також невизначеністю моделей технологічних апаратів (підприємства, в цілому), які характеризуються функціями належності.

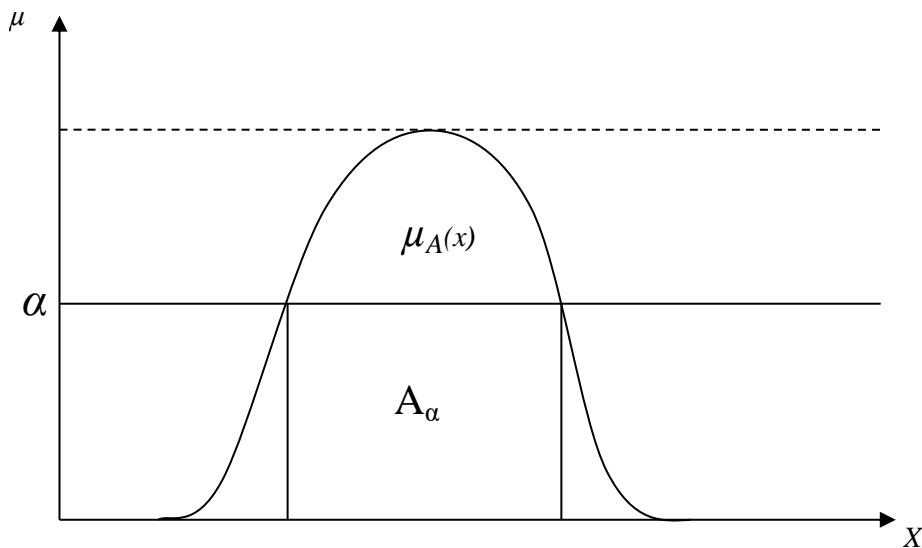
На основі приведеного співвідношення для умов управління технологічними апаратами (тістомісильними машинами, тунельними печами, циклонами, пакувальними агрегатами), холодильними машинами ми в подальшому будемо використовувати їх для побудови нечітких регуляторів в системі машинно – людського керування виробництвом продукції. Нечіткі множини є узагальненим поняттям чіткої множини. Перехід від нечіткої множини до чіткої множини можливий за допомогою поняття множини рівня  $\alpha$ . Під множиною рівня  $\alpha$  ( $\alpha$  - перетин) нечіткої підмножини  $A$  множини  $X$  називають чітку підмножину  $X$ , яку визначають наступним чином:

$A_\alpha = \{x \in X : \mu_A(x) \geq \alpha\} \alpha \in [0,1]$ . Наприклад, для нечіткої підмножини співвідношення борошна з різними характеристиками його сили, що надходять на вхід макаронного заводу буде:

$$A : A = \{(x_1, 0,3), (x_2, 0,5), (x_3, 0,7), (x_4, 0,9), (x_5, 0,2)\}$$

множиною рівня  $\alpha = 0,5$  буде множина  $A_{0,5} = \{x_2, x_3, x_4\}$ .

Графічно цей випадок покажемо на рис 8.2.



**Рисунок 8.2. Інтерпретація  $\alpha$  – перетину**

У теорії нечітких множин існує теорема декомпозиції, відповідно до якої деяку нечітку множину можливо розложити по множинам рівня [58], тобто

$$A = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} A_\alpha$$

Для кінцевого числа градацій функції належності нечіткої підмножини можливо задати об'єднанням кінцевого числа чіткої множини. У випадку без кінцевого числа чіткої підмножини  $A_\alpha, \alpha \in [0,1]$ , тобто фактично є ототожненням виду  $A : [0,1] \rightarrow 2^{\bar{X}}$ , де кожному числу  $\alpha \in [0,1]$  поставлено у відповідності чітку підмножину множини  $X$ .

Для технології основною рисою якої є нечіткість одержаної інформації

про характеристики сировини, що надходить на переробку, її якість, тощо. При цьому виникає необхідність використання експертних знань при побудові інтелектуальних систем контролю і управління. Тобто ми в цьому випадку імітуємо логіку людського мислення (диспетчера) при прийнятті рішень щодо вибору кількості технологічних  $n$  – операцій для виконання замовлення.

Розглянемо евристичний підхід до рішення задач прийняття рішень в умовах нечіткої інформації про сировину, що надходить на підприємство харчової промисловості. У цьому випадку замість детермінованої математичної моделі для представлення логіки прийняття рішень будемо використовувати нечіткі умовні твердження типу:

Якщо сировина (цукровий буряк) відноситься до категорії з невисоким рівнем цукру то, тоді раціональне навантаження на технологічну лінію буде  $Q_{p.н.}$ , витрати води  $W_{вмс}$  ... бо вміст загального цукру в утрелі може не відповідати “нормі”.

Як було показано раніше оператори технологічних секцій цукрового заводу при виборі рішень мислять не в термінах абсолютних значень параметрів цукристості буряка і величин навантаження апаратів, якісних характеристик цукру в стадії кристалізації і цукру в цукровмісній рідині, а в силу свого досвіду ідентифікують їх в поняття “високий рівень”, “низький рівень” завантаження тощо. Можливості людини що приймає рішення (ОПР) в умовах невизначеності можна значно підсилити, якщо використати теорію нечітких множин для побудови інтелектуальних систем керування підприємством його виробничими системами. Основна ідея такого керування полягає у використанні “досвіду експерта” і розробки схеми, яка керує деяким динамічним процесом. Як стверджує творець нечіткої логіки Л.Заде зі зростанням складності системи поступово зменшуються можливості людино-оператора щодо точності керування складними технологічними системами.

В цьому випадку потрібно використовувати архітектуру і основні інструменти систем керування з нечіткою логікою.

### ***8.3. Основні операції нечіткої логіки та принцип роботи системи нечіткої логіки***

Так як в основі теорії чітких множин лежить чітка логіка, а у випадку нечітких множин існує нечітка логіка – основа для операцій над нечіткими множинами. У випадку використання нечіткої логіки можливо створити необмежене число операцій, але на практиці використовують лише найбільш важливі із них.

Розглянемо розширення чітких логічних операцій НІ, І, АБО до нечітких операцій, ці розширення називають відповідно нечіткими запереченнями,  $t$  – нормою і  $s$  – нормою (або  $t$ - конормою).

В нечіткому просторі число станів необмежено велике, тому неможливо операцію заперечення описати у вигляді таблиць істинності, як у випадку двозначної логіки.

Нечітке заперечення – аналог чіткої операції НІ представляє собою

бінарну операцію заперечення у нечіткому сенсі оцінки  $[0,1]$ , що дає у відповіді оцінки  $[1,0]$ . Типова операція нечіткого заперечення – “вирахування із 1”

$$x = 1 - x \quad \forall x \in [0,1]. \quad (8.13)$$

З точки зору нечітких множин це відповідає розумінню додаткової нечіткої множини.

Операція нечіткого заперечення (позначимо її  $N^o$ ) задовольняє наступним умовам:

$$N^o: [0,1] \rightarrow [0,1];$$

$$N^o(0)=1, N^o(1)=0 \text{ – граничні умови};$$

$$N^o(N^o(x))=x \quad \forall x \in [0,1] \text{ – подвійне заперечення};$$

$$x_1 < x_2 \rightarrow N^o(x_1) > N^o(x_2) \text{ - інвертування оцінок.}$$

При  $x=0,5$   $N^o(x)=0,5$ , тобто незмінно, в цьому сенсі  $0,5$  є центральним значенням і звичайно  $x$  і  $N^o(x)$  приймають симетричні значення відносно  $0,5$ . нечітким розширенням  $I$  є  $t$ -норма. Це дійсна функція двох змінних, яка приймає значення на інтервалі  $[0,1]$ :

$$T: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1],$$

задовольняюча наступним умовам:

$$x T 1 = x, x T 0 = 0 \quad \forall x \in [0,1] \text{ – граничні умови};$$

$$x_1 T x_2 = x_2 T x_1 \text{ – комунікативність};$$

$$x_1 T (x_2 T x_3) = (x_1 T x_2) T x_3 \text{ - асоціативність};$$

$$x_1 \leq x_2 \rightarrow x_1 T x_3 \leq x_2 T x_3 \text{ - упорядкованість.}$$

**Типовою операцією  $t$ - норми є операція  $\min$  або логічне множення:**

$$x_1 T x_2 = \min(x_1, x_2) = x_1 \wedge x_2. \quad (8.14)$$

Нечітке розширення АБО  $s$ -норма (називається також  $t$ - конормою). Серед умов, яким повинна задовольняти  $s$ -норма, тільки граничні умови відрізняються від випадку  $t$ -норми, останні – те ж:

$$S: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1];$$

$$x S 1 = 1, x S 0 = x \quad \forall x \in [0,1] \text{ – граничні умови};$$

$$x_1 S x_2 = x_2 S x_1 \text{ – комунікативність};$$

$$x_1 S (x_2 S x_3) = (x_1 S x_2) S x_3 \text{ – асоціативність};$$

$$x_1 \leq x_2 \rightarrow x_1 S x_3 \leq x_2 S x_3 \text{ - упорядкованість.}$$

Типовою  $s$ -нормою є логічна сума, що визначається за допомогою операції  $\max$ :

$$x_1 S x_2 = \max(x_1, x_2) = x_1 \vee x_2. \quad (8.15)$$

Відмітимо, що в чіткій логіці закон суперечливості (деяка якість і заперечення цієї якості одночасно несправедливі) і закон виключення третього (деякі якості і заперечення цієї якості охоплюють усі стан, ніякого проміжного стану немає) оперують лише з двозначними оцінками.

В нечіткій логіці, яка допускає також деякі проміжні оцінки, можливо вважати природнім те, що ці закони несправедливі, тобто не виконується закон комплементарності:  $x \wedge (1-x) \geq 0$ ,  $x \vee (1-x) \leq 1$ , а усі інші якості, що правдиві у чіткій логіці, є слухними. У зв'язку з цим на практиці частіше усього використовуються наведені вище стандартні нелогічні логічні операції, а інші можливі операції – у спеціальних випадках.

Системи керування складними технологічними процесами з нечіткою логікою (СНЛ) в останні роки одержали широке розповсюдження [1,2,8,13,15]. Основна ідея, що використовує в СНЛ, полягає у використанні “досвіду експерта” (людини-диспетчера, особи, що приймає рішення (ОПР)) у розробку системи, яка керує динамічним процесом виробництва продукції. У СНЛ складні відношення між входом і виходом складних динамічних процесів описуються набором правил нечіткої логіки (IF – THEN- правил), що розуміють використання лінгвістичних змінних замість складної динамічної системи. Використання лінгвістичних змінних, правил і законів нечіткої логіки, а також наближених міркувань дозволяє вносити досвід експерта у розроблену схему керування об'єктами виробництва продукції харчування.

Досвід експерта й інженерні знання відіграють дуже значну роль на етапі вибору змінних стану і керованих змінних.

Звичайно вхідними сигналами для СНЛ є стан об'єкту, помилка обчислювання станів, похідна помилки, інтеграл від помилки і т.п. Слідуючи правилам завдання лінгвістичних змінних, вхідний вектор  $X$  і вектор вихідного стану  $Y$ , який вміщує можливі стани (або керовані сигнали) об'єкту керування, можуть бути визначені відповідні так:

$$X = \left\{ (x_i, U_i, \{T_{x_i}^1, T_{x_i}^2, \dots, T_{x_i}^{k_j}\}, \{\mu_{x_i}^1, \mu_{x_i}^2, \dots, \mu_{x_i}^{k_i}\}) \Big|_{i=1, \dots, n} \right\}, \quad (8.16)$$

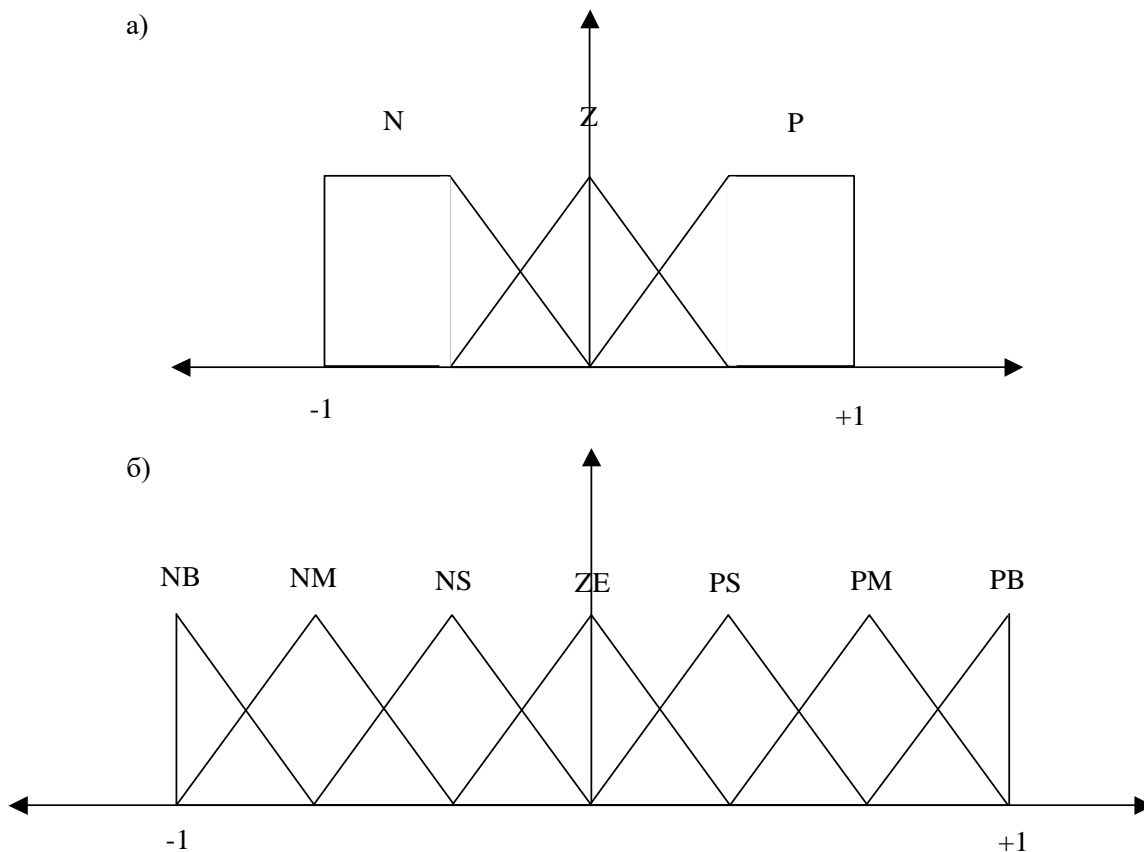
$$Y = \left\{ (y_i, V_i, \{T_{y_i}^1, T_{y_i}^2, \dots, T_{y_i}^{k_j}\}, \{\mu_{y_i}^1, \mu_{y_i}^2, \dots, \mu_{y_i}^{k_i}\}) \Big|_{i=1, \dots, m} \right\}, \quad (8.17)$$

де вхідні лінгвістичні змінні  $x_i$  утворюють нечіткі множини – простір входів  $U = U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$ , а вихідні лінгвістичні змінні  $y_i$  утворюють нечіткі множини – простір виходів  $V = V_1 \times V_2 \times \dots \times V_m$ .

Із рівнянь (8.15), (8.16) слідує, що вхідна лінгвістична змінна  $x_i$  у предметній області  $U_j$  характеризується  $T(x_i) = \{T_{x_i}^1, T_{x_i}^2, \dots, T_{x_i}^{k_j}\}$  і  $\mu(x_i) = \{\mu_{x_i}^1, \mu_{x_i}^2, \dots, \mu_{x_i}^{k_i}\}$ , де  $T(x_i)$  – множина термів для  $x_i$ , тобто множина імен значень лінгвістичних змінних  $x_i$ , пов'язаних з кожним із значень. Наприклад, якщо  $x_1$  означає швидкість підготовки цукрового буряка в технологічному процесі подрібнення, то  $T(x_1) = \{T_{x_1}^1, T_{x_1}^2, \dots, T_{x_1}^{k_j}\}$  може означати {“дуже повільно”, “повільно”, “середньо”, “швидко” і т.п.}. Аналогічно, вихідна лінгвістична змінна  $y_i$  пов'язана з множиною

$$T(y_i) = \{T_{y_i}^1, T_{y_i}^2, \dots, T_{y_i}^{k_j}\} \text{ і } \mu(y_i) = \{\mu_{y_i}^1, \mu_{y_i}^2, \dots, \mu_{y_i}^{k_i}\}. \quad (8.18)$$

Розмір (або потужність) множини термів  $|T(x_i)| = K_i$  визначає число нечітких розподілень вхідного простору на підмножину у відповідності до вибраного ступеня деталізації опису об'єкту керування. На рис.8. За показані три нечітких підмножини на інтервалі  $\{-1, +1\}$ . Випадок семи нечітких підмножин, що перетинаються представлений на рис.8. 3б.



**Рисунок 8.3. Графічне уявлення нечіткої декомпозиції**

а) груба нечітка декомпозиція з трьома нечіткими підмножинами

N – від'ємний; Z – нуль; P – позитивний;

б) більш детальна нечітка декомпозиція з семи компонентів:

NB – від'ємний великий; NM – від'ємний середній; NS – від'ємний малий; ZE – нуль; PS – позитивний малий; PM – позитивний середній; PB – позитивний великий.

Кількість перетинів вхідної множини при рішенні визначеної задачі керування визначає максимальне число правил нечіткої логіки.

Наприклад, у випадку СНЛ з двома входами і двома виходами, якщо  $|T(x_1)| = 3$ , а  $|T(x_2)| = 7$ , то максимальне число правил нечіткої логіки буде дорівнювати  $|T(x_1)| \times |T(x_2)| = 21$ .

Вхідні функції належності  $\mu_{x_i}^k, k = \overline{1, k_i}$  і вихідні функції належності  $\mu_{y_i}^l, l = \overline{1, l_i}$ , що використовуються у СНЛ, звичайно є такими параметричними функціями, як, наприклад, трикутні, трапецеїдальні і функції у формі дзвону.

Правильний вибір нечіткої декомпозиції вхідного і вихідного простору, а також правильний вибір функцій належності відіграють основну роль у процесі досягнення успішного результату при проектуванні СНЛ. Але ці задачі не є детермінованими і не мають універсального рішення.

Звичайно для пошуку оптимальної нечіткої декомпозиції вхідного і вихідного просторів використовують евристичний метод проб і помилок, при цьому вибір вхідних і вихідних функцій належності основний на суб'єктивних критеріях.

Перспективний підхід до автоматизації і прискорення процедури вибору функцій належності пов'язаний з використанням нейронних мереж або мереж Петрі, що забезпечує можливість навчання на прикладах вхідних і вихідних функцій належності, які використовуються в заданій предметній області [1,3,11]. Перейдемо до аналізу основної структури і принципу роботи системи нечіткої логіки. Як правило, типова структура СНЛ складається із чотирьох головних компонент: вхідний перетворювач – блок фазифікації, блок бази правил нечіткої логіки, блок нечіткого логічного виводу і вихідний перетворювач із нечіткої змінної у чітку (блок дефазифікації).

Фазифікація. Блок фазифікації виконує функцію перетворення чітких значень вхідних змінних у нечіткі.

Таке перетворення фактично є свого роду нормуванням, необхідним для переведення вимірних даних у суб'єктивні оцінки. Отже, воно може бути визначено як відображення значень змінних, що їх бачать у відповідні нечіткі.

В реальних СНЛ відображені дані звичайно є чіткими (хоча вони можуть бути зашумленими). Простий метод вхідного перетворення полягає у тому, щоб перетворити чітке значення  $x_0$  у нечіткий сінглетон (singleton).

Це означає, що функція належності  $\mu_A(x)$  буде дорівнювати 1 у точці  $x_0$  і нулю у всіх інших точках.

В даному випадку всяке конкретне значення  $x_i(t)$  в момент часу  $t$  відображається на нечітку множину  $T_{x_i}^1$  зі значенням  $\mu_{x_i}^1(x_i(t))$ , а на нечітку множину  $T_{x_i}^2$  ці значення  $\mu_{x_i}^2(x_i(t))$  і т.п.

Цей метод широко розповсюджений у реальних СНЛ тому, що він суттєво полегшує процес побудови нечітких міркувань. У більш складних випадках, коли відображені дані надходять змішано із випадковими шумами, блок фазифікації повинен перетворювати ймовірні дані у нечіткі числа. Для цього повинно бути визначено взаємооднозначні перетворення, яке трансформує ймовірні значення у можливе за рахунок використання концепції ступені необхідності.

База правил нечіткої логіки. Правила нечіткої логіки зображені набором нечітких “IF – THEN” конструкцій, в яких передумови і висновки розуміють використання лінгвістичних змінних. Цей набір керуючих правил нечіткої логіки (або нечітких управляючих тверджень) характеризує зв'язок входу системи з її виходом.

Загальна форма зображення правил нечіткої логіки для випадку СНЛ з множиною входів і одним виходом (MISO – multi-input-single-output) така:

$$R^i \text{ IF } x \text{ із } A_i, \dots, \text{ AND } y \text{ із } B, \text{ THEN } Z=C_i, i = \overline{1, n}, \quad (8.18)$$

де  $x_1, x_2, \dots, y$  – лінгвістичні змінні, які представляють змінні стани деякого управлінського процесу і управлінські змінні відповідно,  $A_i, \dots, B, C_i$  – лінгвістичні значення змінних  $x_1, \dots, y$  в предметних областях  $U, \dots, V, W$ .

У варіанті іншої форми зображення правил нечіткої логіки розуміють, що заключення представляється як функція змінних стану керованого процесу  $x, \dots$ , у тобто

$$R^i: \text{IF } x \text{ із } A_j, \dots, \text{ AND } y \text{ із } B_i, \text{ THEN } Z=f(x, \dots, y), \quad i = \overline{1, N}, \quad (8.19)$$

де  $f_1(x, \dots, y)$  – функція змінних  $x, \dots, y$  стану керованого процесу.

Нечіткі правила в рівняннях (8.18), (8.19) обчислюють стан процесів (помилку визначення стану, інтегральну помилку станів і т.п. у момент часу  $t$ , потім розраховують і приймають рішення про керовані впливи, що реалізуються у вигляді функцій змінних стану процесу  $(x, \dots, y)$ .

Блок виводу. Блок виводу представляє собою ядро СНЛ, яке використовується для моделювання наближених роздумів і процесу прийняття рішень людиною в складних ситуаціях. Нечіткі виводи, нечіткі або наближені міркування – це найбільш важливі моменти при використанні засобів нечіткої логіки в управлінні складними технологічними процесами.

Для організації нечітких множин необхідно визначити поняття відношення. Припустимо, що знання експерта  $A \rightarrow B$  відбиває нечіткі причинні відношення передумови і заключення, яке називається нечітким  $R$ :

$$R=A \rightarrow B. \quad (8.20)$$

Саме усі реально працюючі прикладні системи, що використовують проміжні нечіткі оцінки, це системи, основані на нечітких продукційних правилах. При виконанні нечітких виводів використовують нечіткі відношення  $R$ , що задані між однією зоною (множина  $X$ ) і іншою зоною (множина  $Y$ ) і у вигляді нечіткої підмножини прямого сполучення  $X \times Y$ , яке визначається по наступній формулі:

$$R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \{(\mu_R(x_i, y_j) | (x_i, y_j))\}, \quad (8.21)$$

де  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  – зона посилянь;

$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$  – зона заключень;

$\mu_R(x_i, y_j)$  - функція належності  $(x_i, y_j)$  нечіткому відношенню  $R: \mu_R(x_i, y_j)$

$\in [0, 1]$ , а знак  $\Sigma$  означає сукупність (об'єднання) множин. Для продукційних правил типу "IF A THEN B", використовуючи нечіткі множини  $A (A \subset X)$  і  $B (B \subset X)$ , один із способів побудови нечіткої відповідності  $R$  полягає у наступному:

$$R = A \times B = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \{(\mu_A(x_i) \wedge \mu_B(y_j) | (x_i, y_j))\}, \quad (8.22)$$

або

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)), \quad (8.23)$$

де  $\mu_A(x), \mu_B(y)$  - функції належності елементів  $x, y$  відповідно множинам  $A$  і  $B$ . Для згортки (композиції) нечітких відношень частіше вибирається згортка  $\max\text{-}\min$  (максимінна композиція). Нехай  $R$  – нечітке відношення множини  $X$  і множини  $Y$ , а  $S$  – нечітке відношення множини  $Y$  і множини  $V$ . Тоді нечітке співвідношення між  $X$  і  $V$  визначається як згортка (композиція)  $R \circ S$ , де

$$R \circ S = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1, y_j \in Y}^i \vee (\mu_R(x_i, y_j) \wedge \mu_S(y_j, v_k)) | (x_i, v_k), \quad (8.24)$$

або



$$R \circ S = \max_{y_j \in Y} \min(\mu_R(x_i, y_j), \mu_g(y_j, v_k)) | (x_i, v_k). \quad (8.25)$$

R можемо розглянути як нечітку множину на декартовому сполученні  $X \times Y$  повного простору передумов  $X$  і повного простору висновків  $Y$ .

Таким чином, процес одержання (нечіткого) результату виводу  $B'$  з використанням даних спостережень  $A'$  і знання  $A \rightarrow B$  можливо представити у вигляді формул

$$B' = A' \circ R = A' \circ (A \rightarrow B).$$

Для використання в нечітких міркуваннях в СНЛ узагальнених висновків, які можуть бути записані наступним чином:

Умова 1: IF  $x$  із  $A$  THEN  $y$  із  $B$

Умова 2:  $x$  із  $A'$  (8.26)

Вивід:  $y$  із  $B'$ ,

де  $A, A', B, B'$  - нечіткі предикати (нечіткі множини або відношення) в універсальних множинах  $U, U, V, V$  відповідно.

В загальному випадку, правило керування нечіткої логіки (тобто умова 1 в рівнянні (8.26) є нечітким відношенням, яке записано у вигляді нечіткої імплікації  $R = (A \rightarrow B)$ .

У відповідності з композиційним правилом виводу із рівняння (8.26) вивід  $B'$  може бути одержаним при взятті нечіткої композиції нечіткої множини  $A'$  і нечіткого співвідношення (у даному випадку це нечітке співвідношення є нечіткою імплікацією)  $A \rightarrow B$ :

$$B' = A' \circ R = A' \circ (A \rightarrow B). \quad (8.27)$$

Крім нечіткої композиції і нечіткої імплікації існують інші типи композиційних операторів, які можуть бути використані в композиційному правилу виводу. До цих операторів відносяться оператори, пов'язані з t-нормами: операція мінімуму Заде, операція добутку Кауфмана, операція граничного добутку і т. ін. В СНЛ, що застосовуються в системах керування виробництвом продуктів харчування високої якості, композиційні оператори мінімуму і добутку використанні найбільш широко із-за їх обчислювальної простоти і ефективності.

Якщо забезпечити через  $\langle * \rangle$  будь-який із можливих композиційних операторів, рівняння (8.27) приймає вигляд:

$$B' = A' * R = A' * (A \rightarrow B).$$

$$B' \mu_{B'}(v) = \sup_u \{ \mu_{A'}(u) \mu_{A \rightarrow B}(u, v) \}, \quad (8.29)$$

де  $\langle * \rangle$  означає такі операції t-нормування, як операції мінімуму, добутку, обмеженого добутку і радикального добутку.

Якщо детально розглянути нечітку імплікацію типа  $A \rightarrow B$ , то існує близько 40 різних функцій нечіткої імплікації, які наведені в табл.8.1.

Перші чотири нечіткі імплікації наведені в таблиці є t-нормами.

Наприклад, нечітка імплікація мінімуму Мандані одержується, якщо в нечіткій кон'юнкції використовувати оператор межування, а операція добутку Арсена одержується, якщо у нечіткій кон'юнкції використовувати алгебраїчний добуток.

Арифметичне правило Заде здобує при використанні оператора обмеження суми, правило мінімуму Заде – операторів перехрестя і об'єднання.

Решта правил нечіткої імплікації із таблиці 8.1 можуть бути одержані за рахунок використання різних визначень нечітких імплікацій.

**Таблиця 8.1**

**Правила нечіткої імплікації**

Правило нечіткої імплікації	Формула імплікації	Нечіткі імплікація $\mu_{A \rightarrow B}(u, v)$
Правило min (Мандані)	$x \rightarrow y = x \wedge y$	$\mu_A(u) \wedge \mu_B(v)$
Логічний добуток (Ларсен)	$x \rightarrow y = x \cdot y$	$\mu_A(u) \cdot \mu_B(v)$
Граничний добуток	$x \rightarrow y = 0 \vee (x + y - 1)$	$0 \vee [\mu_A(u) + \mu_B(v) - 1]$
Драстичний добуток	$x \rightarrow y = \begin{cases} x, & \text{якщо } y = 1 \\ y, & \text{якщо } x = 1 \\ 0 & \text{якщо } x, y < 1 \end{cases}$	$\begin{cases} \mu_A(u), \mu_B(v) = 1 \\ \mu_B(v), \mu_A(u) = 1 \\ 0, \mu_A(u), \mu_B(v) < 1 \end{cases}$
Арифметичне правило Заде	$x \rightarrow y = 1 \wedge (1 - x + y)$	$1 \wedge (1 - \mu_A(u) + \mu_B(v))$
Мах-min правило Заде	$x \rightarrow y = (x \wedge y) \vee (1 - x)$	$\mu_A(u) \wedge \mu_B(v) \vee (1 - \mu_A(u))$
Правило Шарпа	$x \rightarrow y = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x \leq y \\ 0 & \text{якщо } x > y \end{cases}$	$\begin{cases} 1, \mu_A(u) \leq \mu_B(v) \\ 0, \mu_A(u) > \mu_B(v) \end{cases}$
Правило Буля	$x \rightarrow y = (1 - x) \vee y$	$(1 - \mu_A(u)) \vee \mu_B(v)$
Правило Геделя	$x \rightarrow y = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x \leq y \\ y & \text{якщо } x > y \end{cases}$	$\begin{cases} 1, \mu_A(u) \leq \mu_B(v) \\ \mu_B(v), \mu_A(u) > \mu_B(v) \end{cases}$
Правило Гогена	$x \rightarrow y = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x \leq y \\ y/x & \text{якщо } x > y \end{cases}$	$\begin{cases} 1, \mu_A(u) \leq \mu_B(v) \\ \frac{\mu_B(v)}{\mu_A(u)}, \mu_A(u) > \mu_B(v) \end{cases}$

Модель прийняття рішень на основі композиційного правила виведення описує зв'язок усіх можливих станів складної системи з управлінськими рішеннями. Формально модель задається у вигляді трійки  $(X, R, Y)$ , де  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ,  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$  – базові множини, на яких задані входи  $A_j$  і

виходи  $V_j$  системи,  $R$  – нечітка відповідність “вхід-вихід”. Відповідність  $R$  будується на основі мовної кількісної інформації, яка представляється спеціалістами-експертами шляхом безпосередньої формалізації їх нечітких стратегій.

Експерти описують особливості прийняття рішень при функціонуванні складної системи у вигляді ряду висловлювань типу:

IF  $A_1$ , THEN  $B_1$ , ELSE IF  $A_2$ , THEN  $B_2, \dots, \text{ELSE IF } A_N \text{ THEN } B_N$ ;

тут  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_N$  – нечіткі підмножини, визначені на базовій множині  $X$ , а  $B_1, B_2, \dots, B_N$  – нечіткі підмножини із базової множини  $Y$ . Усі ці нечіткі підмножини задаються функціями належності  $\mu_{A_i}(\tilde{a}) \quad \mu_{B_i}(y)$ .

Правило “IF  $A_i$  THEN  $B_i$ ” визначається функцією належності  $\mu_{R=A \rightarrow B}(x, y)$ , що одержана по формулі (8.22).

Зв'язку “ІНАКШЕ” між правилами розуміють як АБО – зв'язка, оскільки загальне нечітке відношення складається із Правило 1, АБО правило 2, АБО, ..., АБО правило  $N$ . Тому загальне відношення  $R$  формально визначається наступним чином:

$$R = \bigcup_i R_i = \max_i [\min(\mu_{A_i}(\tilde{a}), \mu_{B_i}(y))], i = \overline{1, N}. \quad (8.30)$$

Якщо припустити, що ми маємо нечітку подію  $A'$ , тобто вхідну ситуацію, що зображена нечіткою підмножиною, і відомо загальне відношення  $R$ , тоді результуюча дія виводиться по композиційному правилу виводу:  $B' = A' \cdot R$ .

Значення функції належності для  $B'$  обчислюється за рахунок максимінної операції:

$$\begin{aligned} \mu_{B'}(y) &= \bigvee_{x \in X} (\mu_{A'}(x) \wedge \mu_R(x, y)) = \bigvee_{x \in X} (\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{A'}(x) \wedge \mu_B(y)) = \\ &= (\bigvee_{x \in X} (\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{A'}(x))) \wedge \mu_B(y) = \bigvee_{x \in X} \mu_{A' \cap A}(x) \wedge \mu_B(y) = a \wedge \mu_x(y) = \\ &= \mu_{aY \cap B}(y). \end{aligned} \quad (8.31)$$

Рівняння (8.31) найбільш чітко використовуються в нечітких системах виводу, оскільки на основі цих рівнянь при відомих функціях належності кінцеві результати обчислюються дуже просто. Крім того, забезпечується графічна інтерпретація механізму нечіткого виводу. Розглянемо найбільш важливі модифікації нечіткого виводу. Для спрощення припустимо, що у базі даних маємо два правила, представлені у вигляді

$R_1$ : IF  $x$  is  $A_1$  AND  $y$  is  $B_1$  THEN  $z$  is  $C_1$ ,

$R_2$ : IF  $x$  is  $A_2$  AND  $y$  is  $B_2$  THEN  $z$  is  $C_2$ ,

де  $x, y$  – імена вхідних змінних,  $z$  – ім'я вихідної змінної;  $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2$  – визначені функції належності.

Необхідно знайти чітке значення змінної  $z_0$  на основі значень  $x_0, y_0$ , що задані.

Рівень істинності для першого ( $R_1$ ) і другого ( $R_2$ ) правила можуть бути виражені як:

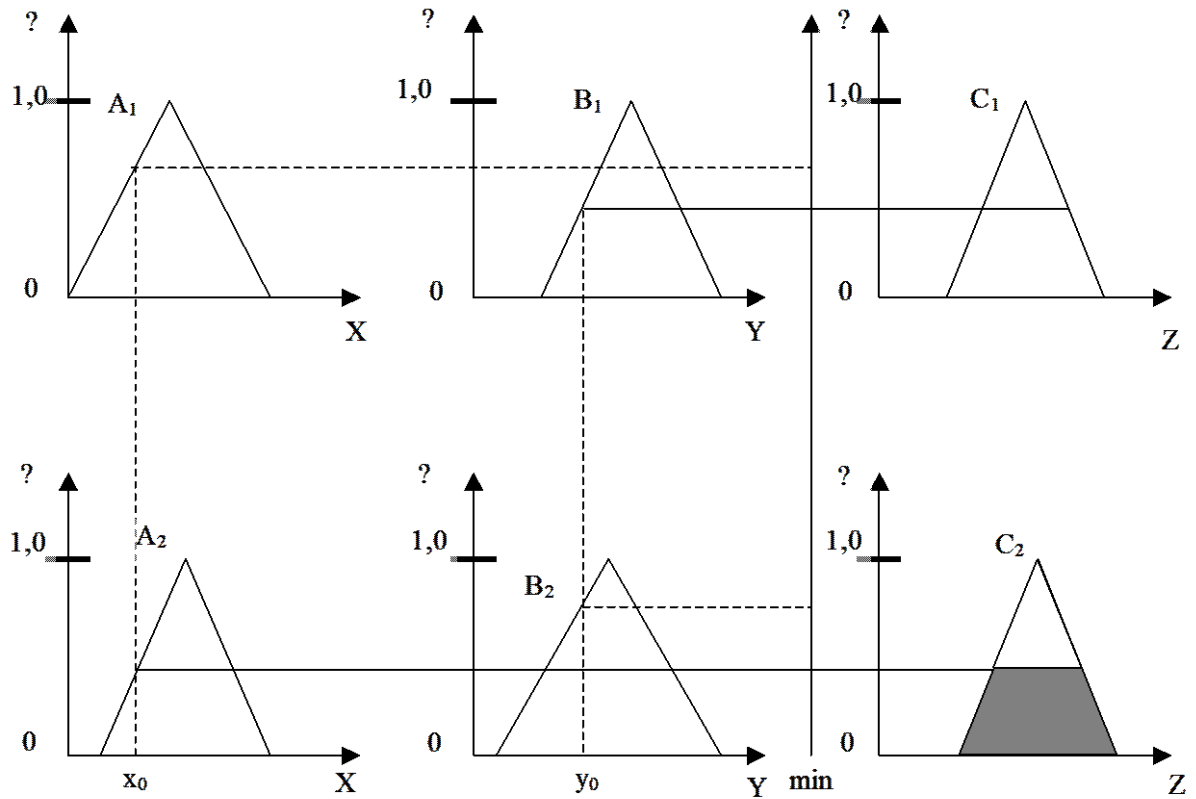
$$a_1 = \mu_{A_1}(x_0) \wedge \mu_{B_1}(y_0) \quad \text{і} \quad a_2 = \mu_{A_2}(x_0) \wedge \mu_{B_2}(y_0), \quad (8.32)$$

де  $\mu_{A_1}(x_0)$  і  $\mu_{B_1}(y_0)$  визначають ступінь відповідності між корисними вимогами і даними, що задаються у правилі.

Нечіткий вивід по Мамдані. В цьому варіанті нечіткого виводу використовуються операції взяття мінімуму у якості нечіткої імплікації (рис. 8.4).

Тоді кожне і-те правило приведе до наступного рішення:

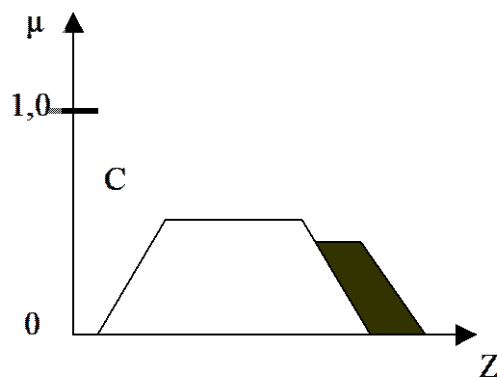
$$\mu_{C_i}(z) = a_i \wedge \mu_{C_i}(z).$$



**Рисунок. 8.4.** Діаграма нечіткого виводу по Мамдані

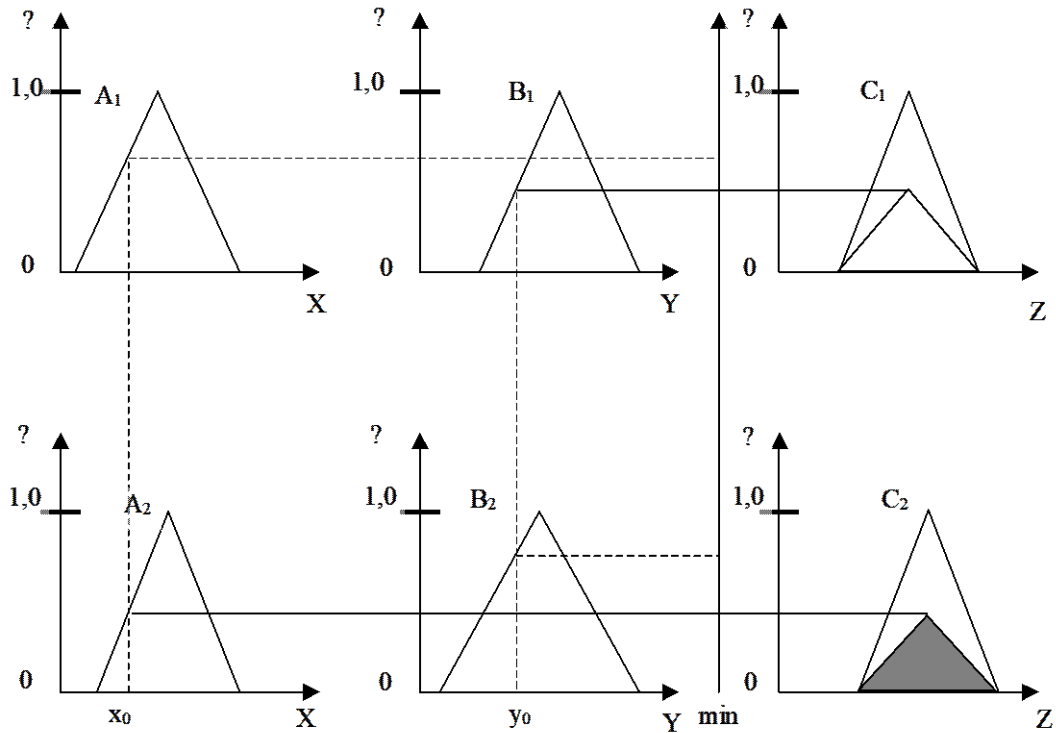
На наступному етапі виконується операція взяття максимуму і у результаті чого одержуємо сумарний висновок (рис.8. 5).

$$\mu_C(z) = \mu_{C_1} \vee \mu_{C_2} = [a_1 \wedge \mu_{C_1}(z)] \vee [a_2 \wedge \mu_{C_2}(z)]. \quad (8.33)$$



**Рисунок.8. 5.** Ілюстрація одержання сумарного результату нечіткого виводу по Мамдані

Нечіткий вихід по Ларсену. В якості операції нечіткої імплікації в цьому варіанті нечіткого виводу використовують операцію добутку (рис.8.6).



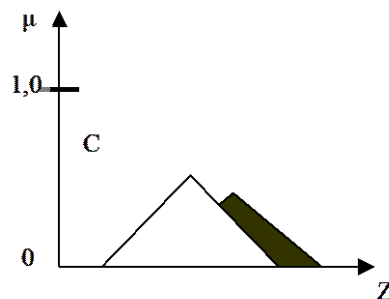
**Рисунок 8.6.** Діаграма нечіткого виводу по Ларсену

В цьому випадку одержуємо наступне рішення:

$$\mu_{C_1} \cdot (z) = a_1 \mu_{C_1} (z).$$

На заключному етапі функція належності  $\mu_i$  визначається шляхом об'єднання нечітких підмножин (рис.8.7).

$$\mu_C(z) = \mu_{C_1} \vee \mu_{C_2} = [a_1 \wedge \mu_{C_1}(z)] \vee [a_2 \wedge \mu_{C_2}(z)]. \quad (8.34)$$



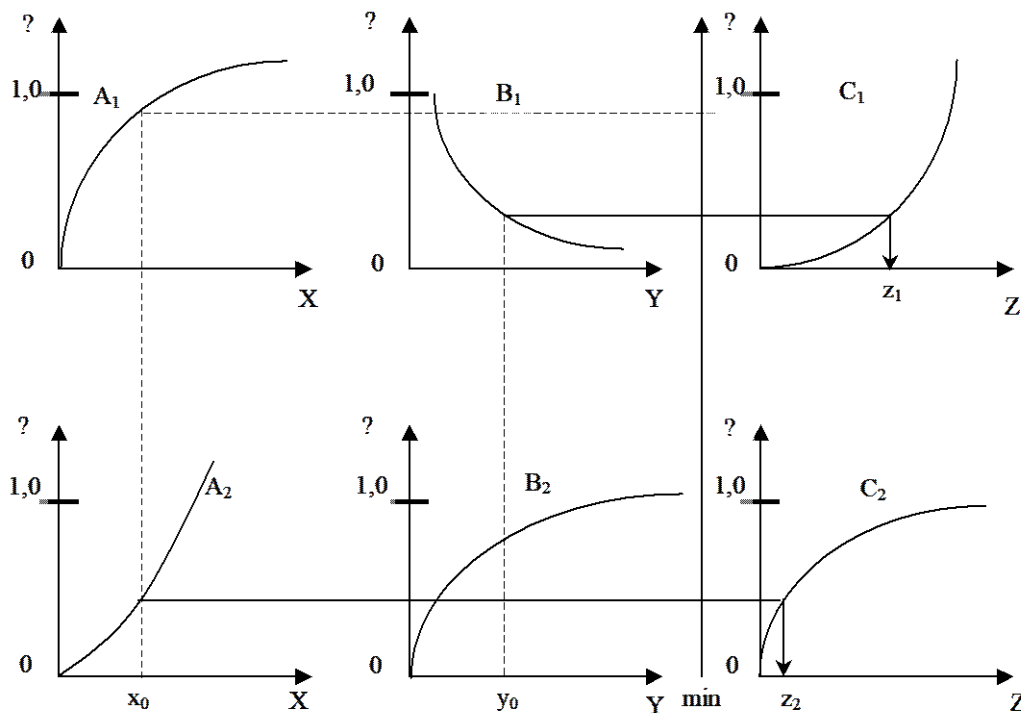
**Рисунок.8.7.** Ілюстрація одержання сумарного результату нечіткого виводу по Ларсену.

Нечіткий вивід по Цукамото. Це спрощений нечіткий вивід, що базується на класичному композиційному виводу, але в цьому випадку потрібно звернути увагу на монотонність функції  $C_i$ .

В цьому випадку  $\mu_{C_i}$  повинна бути такою монотонною функцією, що існує їй зворотна функція  $\mu^{-1}_{C_i}$ . Результати виводу із першого і другого правил (рис. 8.8) представлені так

$$z_1 = \mu^{-1}_{C_1}(a_1) \text{ і } z_2 = \mu^{-1}_{C_2}(a_2). \quad (8.35)$$

Відповідно чітке значення вихідної змінної одержуємо як вагову комбінацію



**Рисунок.8.8.** Діаграма процедури нечіткого виводу по Цукамото

$$z_0 = \frac{a_1 z_1 + a_2 z_2}{a_1 + a_2}. \quad (8.36)$$

**Контрольні запитання:**

1. Поясніть основи методології формалізації і переробки нечіткої інформації.
2. Подати визначення операцій у математичному апараті нечітких множин.
3. Навести основні принципи побудови інформаційних систем.
4. Основні операції нечіткої логіки та принцип роботи системи нечіткої логіки.
5. Вказати особливості методу фазифікації.
6. Подати інтерпретацію графічного уявлення нечіткої декомпозиції. Навести правила нечіткої імплікації.
7. Подати інтерпретацію виведення нечіткої інформації.
8. Наведіть приклади сумарного результату нечіткого виводу по Мамдані, Ларсену, та Цукамото.

## **Тема 9. Теоретичні основи проєктування автоматизованих систем управління технологічними процесами виробництва смарт-продуктів**

### **9.1. АСУТП хлібозаводів з виробництва смарт-продуктів харчування**

Сучасні технологічні відділення та підрозділи хлібозаводів складаються із десятків технологічних апаратів, робототехнологічних комплексів, установок, в яких протікає технологічний процес виробництва напівфабрикатів, продукту або підготовки допоміжних матеріалів, енергоносіїв, теплоносіїв та інших інгредієнтів.

На рис.9.1. наведено один із прикладів розробки структури автоматизованого управління хлібозаводом з виробництва N-сортів хлібобулочних та макаронних виробів. В автоматизованій системі встановлені: 1- датчики-перетворювачі технологічного процесу (ТП), 2- виконавчі механізми та електродвигуни технологічного обладнання, 3- нормуючі перетворюючі, сигналізатори параметрів, блоки електропостачання, які змонтовані на щитах; 4 - пускова апаратура електродвигунів і виконавчих механізмів, 5- пульт оператора, 6- локальна комп'ютерна мережа, 7- локальні мікропроцесорні контролери SCADA-системи, 8- мережеві мікропроцесорні контролери, 9- програмно-технічний комплекс (ПТК), 9.1- друкувальні пристрої, 9.2- Мікро-ЕОМ і ПЗО, 9.3- відеотермінал; 10 - монітор корпоративної продуктивності, 11- АРМи-операторів-технологів АСУТП, 12- персональні ЕОМ; 13- базова ЕОМ верхнього рівня, 13.1- зовнішній пристрій пам'яті (вінчестер), 13.2- ЕОМ, 13.3- відео термінал, 13.4- пристрій друку; 14- сервер бази даних підприємства, 15- АРМ АСУ, MES, ERP, SCADA - системи. Крім цього в системі позначено: ПЗ- програмне забезпечення; ІоТ- промисловий інтернет-речей; ВТК- виробничо-технологічний комплекс; ТП- технологічний процес; ПЗО - пристрій зв'язку з об'єктом; ТО- технологічне обладнання, ЛСК- локальні системи керування; АСУВ- автоматизована система керування окремими дільницями, а саме: АСУТП- підготовки борошна та інгредієнтів; АСУТП приготування опари - тіста; АСУТП випікання хліба; АСУТП стадії заморожування та логістики. Автоматизоване керування технологічними відділеннями або підрозділами виконується під керівництвом головного технолога і топ-менеджерів хлібозаводу, за допомогою експертних систем з автоматизованими робочими місцями (АРМ) та монітором корпоративної продуктивності (МКП).

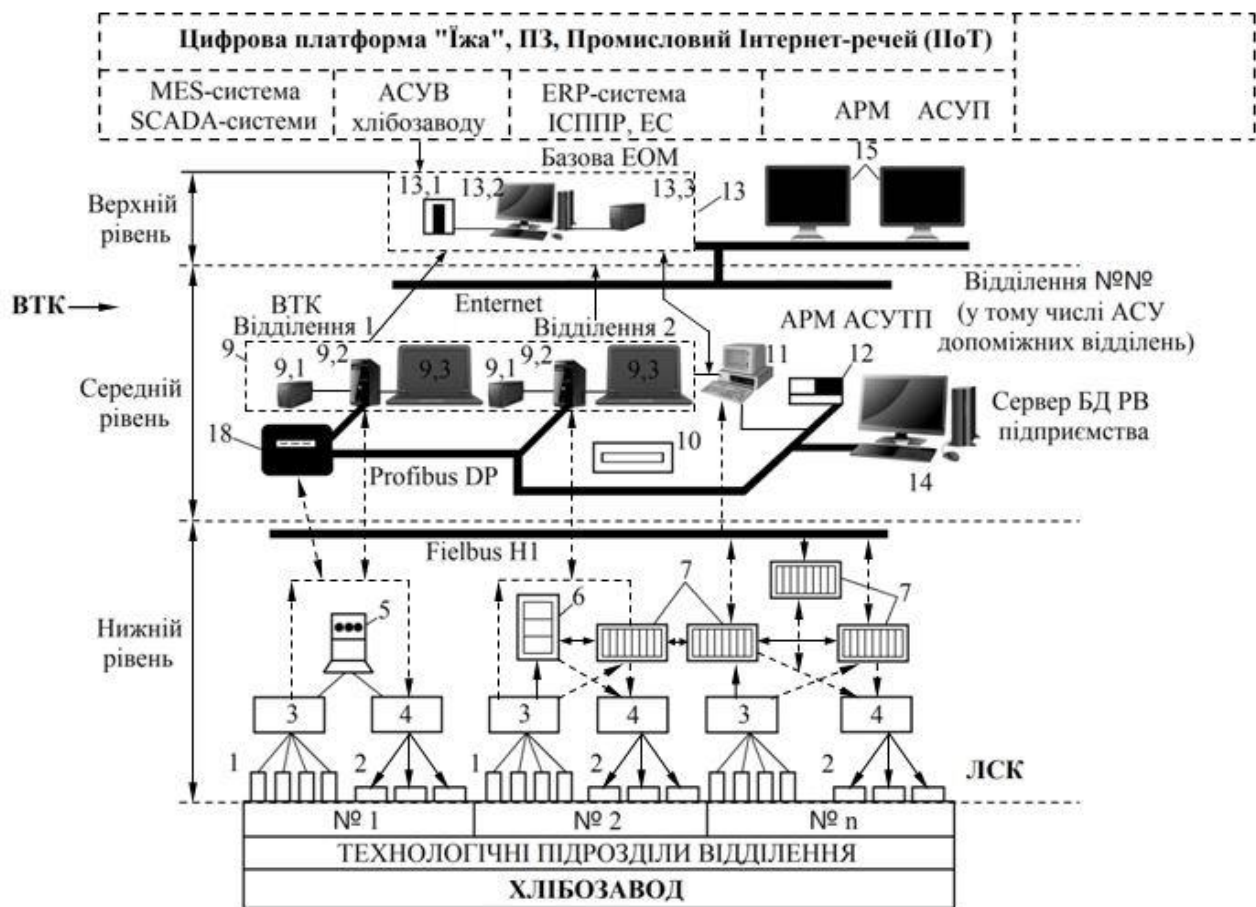
Такий підхід до проєктування трьохрівневих АСУТП, які відповідають технології Індустрії-4,0 UK автоматизованого управління хлібозаводами на стратегічному періоді розвитку харчової продукції до 2030 року можливо представити етапом впровадження дворівневих АСУТП до 2025 року.

На рис. 9.2. наведені проєктні рішення щодо проєктування дворівневих АСУТП.

У таких проєктах важливу роль будуть відігравати рішення АСУТП щодо прямого цифрового керування технологічними відділеннями 1,2,...№ з використанням сучасного програмного забезпечення (ПЗ), алгоритмів цифрового керування, інформаційних систем, інтелектуальних датчиків та виконавчих механізмів.

Розглянемо приклади таких проектних рішень для умов хлібо заводів Придніпровського регіону.

Розпочнемо цей аналіз з проектної реалізації АСУТП дільниці підготовки борошна та іншої сировини. Один із прикладів сучасних рішень детально розглянуто в [13], коли АСУТП відділення працює в режимі інтелектуального порадника технолога. При цьому на всіх рівнях управління підготовки борошна та інгредієнтів використані мікропроцесори типу AL-2000S в комплекті з ЕОМ(Pentium) для відображення інформації, введення завдання і виконання контролю параметрів процесу в реальному масштабі часу (РЧ) приготування розчинів, які надходять у виробництво тіста.



**Рисунок 9.1. Автоматизована система управління технологічним процесом хлібо заводу:**

1 – датчики-перетворювачі технологічного процесу (ТП), встановлені на технологічному обладнанні (ТО); 2 – виконавчі механізми та електродвигуни технологічного обладнання; 3 – нормуючі перетворювачі, сигналізатори параметрів, блоки електропостачання, змонтовані на щитах; 4 – пускова апаратура електродвигунів виконавчих механізмів; 5 – пульт оператора; 6 – локальна комп’ютерна мережа; 7 – локальні мікропроцесорні контролери; 8 – мережеві мікропроцесорні контролери; 9 – програмно-технічний комплекс (ПТК); 9,1 – друкувальні пристрої; 9,2 – мікроЕОМ, пристрій зв’язку з об’єктом (ПЗО); 9,3 – відео-термінал; 10 – монітор корпоративної продуктивності; АРМ оператора-технолога АСУТП; 12 – персональні ЕОМ; 13 – базова ЕОМ верхнього рівня; 13,1 – зовнішній пристрій пам’яті (вінчестер); 13,2 – ЕОМ, відео термінал; 13,3 – пристрій друку;



14 – сервер бази даних підприємства; 15 – АРМ АСУТП; MES (Manufacturing Execution System) – система управління виробничими процесами; ERP – система стратегічного управління підприємством; SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) – система диспетчеризації, управління і збору даних; ПЗ – програмне забезпечення; ПоТ – Промисловий Інтернет-речей; ВТК – виробничо-технологічний комплекс; ТП – технологічний процес; ТО – технологічне обладнання; ЛСК – локальні системи керування; АСУВ – автоматизована система управління виробництвом

АСУТП виробництва опари-тіста, як приклад, може бути реалізована у вигляді системи з супервізорним керуванням (рис.9.2). Перший рівень управління включає систему датчиків та сигналізаторів параметрів, засоби керування виконавчими механізмами та пускової апаратури. Пульти керування ТП і технологічне обладнання розташовані в місцях об'єктів керування. Взаємозв'язок апаратури забезпечується за допомогою HART-протоколу шляхом використання польової мережі FieldbusH1. Другий рівень управління передбачає використання мережевих мікропроцесорів достатньої інформаційної потужності (аналогових сигналів введення/виведення 16/256, дискретних введення/виведення 16/256) в кількості трьох комплектів з резервуванням на базі управлінської ЕОМ (Pentium11), АРМ - оператора-технолога та АРМ оператора лабораторії хлібозаводу на базі IBM PC-486. Одержання та передача інформації забезпечується шляхом мережевих структур (наприклад, промислової мережі ProfibusDP). Операційна система (ОС) пультив функціонує за допомогою ОС WindowsNT. Основне програмне забезпечення (ПЗ) пультив керування забезпечується або SCADA- програмою PARAGON, або програмою Трейс Моуд, які реалізують основні функції візуалізації вимірюваних і контрольованих величин, передачі даних і команд в систему контролю й керування. Відкритість SCADA- програми забезпечує функціонування системи керування в OPC- сервері, що гарантує роботу мережевих структур без спеціальних драйверів. Інформаційна потужність АСУТП відділення опари складає: сигнали введення/ виведення складають 24/24, тобто 48. Із них аналогові вхід - вихід 12/8, дискретні вхід/вихід 12/16, що значно менше інформаційної потужності контролера AL-2000S. Інформаційна потужність АСУТП приготування тіста складає: вхід/ вихід 16/16, тобто 32. Із них аналогових сигналів 11/11, дискретні сигнали складають 5/5. тобто теж існує резерв. Існуючі АСУТП приготування опари-тіста забезпечують відображення інформації, контроль надходження сировини, введення завдань та команд з клавіатури пультив, а також керування технологічним процесом. З метою аналізу результатів вимірювання параметрів вхідної сировини на кожному із хлібозаводів Придніпровського регіонів є заводська лабораторія, яка: оцінює стан основної і додаткової сировини, готовності напівфабрикатів і тіста, оформлення товарно-транспортних накладних з постачальниками використовують АРМ лабораторії на базі IBM-486. Інформація з лабораторії надходить по стандартному інтерфейсу до АРМ- технолога, відділення надходження борошна, приготування рідких компонентів, напівфабрикатів і тіста. Команди керування і дані введення надходять в мікропроцесор оператора-технолога за допомогою клавіатури та відеотерміналів. В АСУТП

відділення тісто приготування входять модулі введення аналогових, дискретних і число-імпульсних сигналів, які необхідні для формування інформації від вимірювальних перетворювачів технологічних параметрів і дискретних пристроїв, також модулів виведення дискретних і аналогових сигналів щодо цифрового керування технологічним процесом за рахунок виконавчих механізмів( клапани, ТПЧ, електродвигуни АД, заслінки і т.п.), Розглянуті АСУТП забезпечують виконання наступних функцій:

1. Регулювання витрат компонентів, які надходять в технологічні апарати за допомогою дозаторів і контролюються тензOMETричною системою з виходом на АЦП (ADAM-5012), регулюючий канал AL-2000S і в подальшому на ЦАП (ADAM-5021) та керування ВМ заслінки;

2. Регулювання тривалістю бродіння опари, яке реалізується шляхом зміни ступеня заповнення робочої ємності установки для бродіння; регулювання температури рідкої опари в процесі бродіння зміною витрат холодної і гарячої води в сорочку установки ( робочий канал AL-2000S.);

3. Регулювання інтенсивності механічного оброблення тіста в процесі замісу в тістомісильній машині, виконується зміною частоти обертання місильних органів пластифікатора за допомогою логіко-програмного каналу AL-2000S;

4. Світлова та звукова сигналізація про відхилення параметрів від заданих значень режимів роботи обладнання, фіксується на пульті керування ЕОМ і АРМ- технолога;

5. Контроль і сигналізація про поточний стан рівня компонентів у витратних ємностях і дозаторах виконується за допомогою AL2000S, АЦП (ADAM-5012) і ЦАП (ADAM-5021);

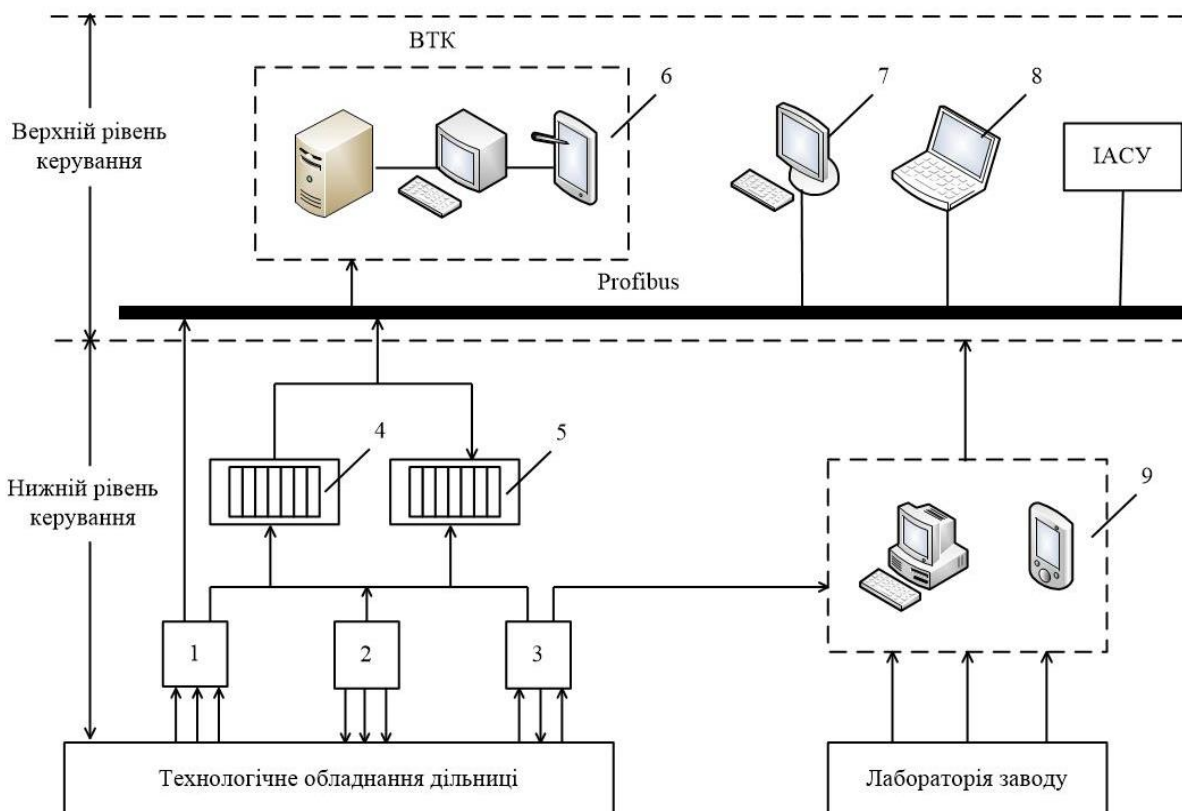
6.Контроль споживаної потужності в процесі замісу та якісних показників тіста, виконується шляхом АЦП (ADAM-5012) логіко-програмним каналом AL-2000S з виведенням сигналів на ЦАП (ADAM- 5021) та їх реєстрації в АРМ технолога і управлінської ЕОМ;

7. Контроль температурних робочих режимів виконується за допомогою системи ADAM-5013 та віддзеркалюється на дисплеї АРМ технолога і ЕОМ;

8 Автоматизований та ручний режими роботи виконавчих механізмів виконуються з пульта АРМ технолога та ЕОМ

9. Автоматичне блокування з метою відключення механізмів в процесі виникнення аварійних режимів виконується з пультів АРМ - технологів відділень та управлінської ЕОМ.

В процесі переходу до інтелектуальних автоматизованих систем управління технологічними процесами виробництва хлібобулочних виробів (рис.9.1, 9.2), які відповідають вимогам до смарт-підприємств Індустрії-4.0,у першу чергу топ-менеджерів підприємства необхідно забезпечити (в режимі РЧ) якісною інтернет-інформацією про: якісні характеристики сировини, характеристики води,енергоносії та інгредієнти, споживачів продукції і параметри портфеля замовлень, потоки грошей на вході/виході системи. Цими важливими аспектами управління буде займатись верхній (третій) рівень управління з розробленою платформою «ІЖА», MES та ERP.- системами.



**Рисунок 9.2. Структура технологічних операцій та адаптивних систем керування заводом з виробництва хлібомакаронних виробів.**

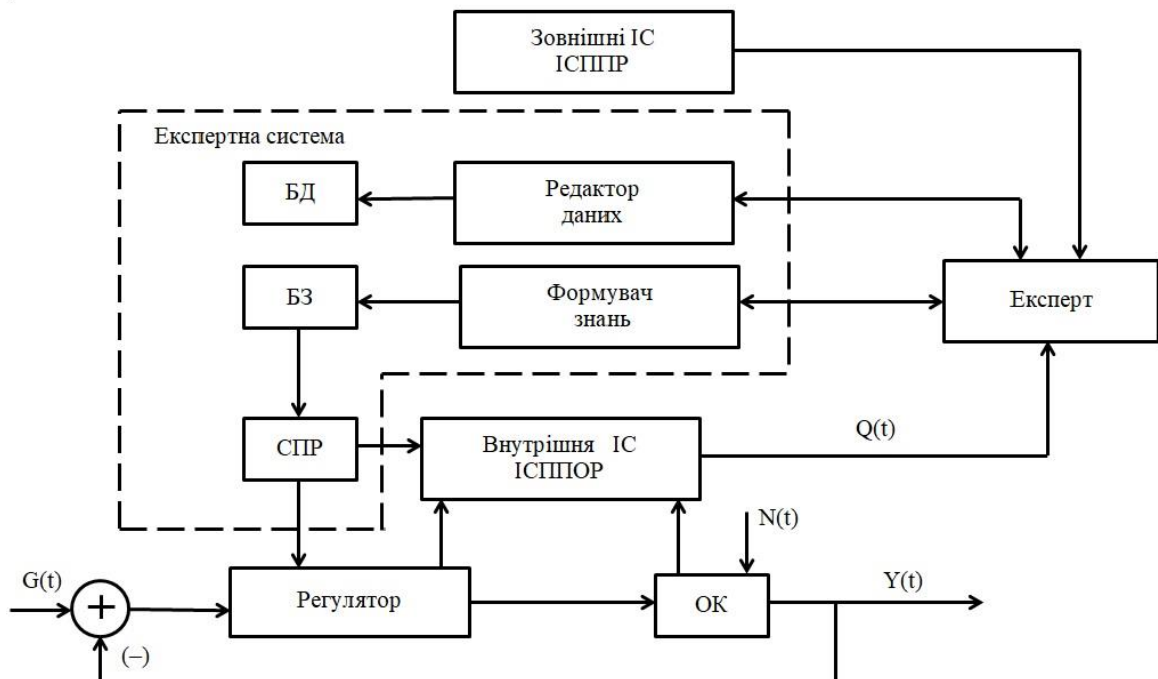
Система керування з виробництвом хлібо-макаронних виробів складається з: 1, 2, 3 – АСУТП дільниць, відповідно, підготовки сировини, замісу, хлібомакаронних виробів; 4, 5 – інформаційні системи вимірювання та контролю основних технологічних величин; 6 – програмно-обчислювальний комплекс виробничо-технологічного комплексу (ВТК); 7 – автоматизоване робоче місце (АРМ) оператора-технолога; 8 – АРМ топ-менеджера; IACU - інтелектуальна автоматизована система управління підприємством; 9- АРМ лабораторії заводу

Нижній рівень АСУТП заводу складається із датчиків та локальних адаптивних систем керування, які забезпечують формування інформації про протікання технологічного процесу виробництва хлібобулочних та макаронних виробів, а також інформації про стан технологічного обладнання. У процесі керування технологічними процесами персонал заводу повинен бути забезпечений інформацією в реальному масштабі часу (РЧ), а отже безперервне і своєчасне забезпечення системи управління хлібозаводом інформацією і усіма необхідними знаннями є основною функцією інформаційного забезпечення. Інформаційне забезпечення АСУ-АСУТП заводу - це сукупність єдиної класифікації та кодування техніко-економічної інформації, уніфікованих систем документації і масивів інформації, які використовуються в системах керування (ГОСТ 19675-74). Іншими словами при проектуванні АСУТП хлібокомбінатів необхідно мати:

-сукупність даних, певних засобів їх опису, методів організації, збереження, накопичення і доступу до інформаційних масивів, які забезпечують надання усїєї інформації, необхідної в процесі реалізації функціональних задач АСУТП.

Для побудови та формування баз даних, баз прецедентів та баз знань будемо використовувати датчики інформації, основані на взаємодії ультразвукових коливань з гетерогенним середовищем, а також експертні оцінки технологів для побудови експертних систем керування технологічними процесами виробництва хлібобулочних та макаронних виробів.

На рис 9.3 наведено типову експертну систему, в якій використано блок СПР-системи прийняття рішень щодо оперативного керування виробництвом продукції (внутрішня інформаційна система (ІС) з інтелектуальною системою підтримки прийняття оперативних рішень (ІСППОР) на основі аналізу виробничих ситуацій з використанням форми презентації знань. В загальній структурі експертної системи (ЕС) в якості об'єкта керування (ОК) прийнято технологічну лінію з виробництва смарт продукції ІС та ІСППР- інтелектуальну систему підтримки прийняття рішень. Головною відзнакою експертних систем і систем оброблення даних полягає в тому,що в них використано символічний метод, а не чисельний метод представлення даних, а в якості методів оброблення інформації використовується процедура логічного виводу та евристичного пошуку рішень.



**Рисунок 9.3. – Типова експертна система керування**

В запропонованій АСУТП хлібозаводу на нижньому рівні керування використані інтелектуальні датчики контролю, інтелектуальні виконавчі механізми (ВМ), мікропроцесорні системи керування технологічними стадіями та окремими апаратами, а також мікропроцесори вбудовані в прилади й в блоки введення-виведення.

Такий підхід відповідає ідеології FieldbusFonndation, яка ставе за мету перенесення типових алгоритмів переробки інформації (фільтрації, масштабування, лінеаризації тощо), регулювання (стабілізації, слідування, каскадного керування і т.п.), логічного керування (пуск, зупинка, блокування і т.п.) на нижній рівень інтелектуальних блоків введення-виведення, датчиків та ВМ. З метою використання цієї ідеології в АСУТП хлібозаводу використана типова польова мережа Fieldbus H1. Ця мережа реалізує всі функції, які властиві HART-протоколу, за допомогою якого є можливість програмувати конкретні алгоритми контролю і керування, які реалізовані в приладах, датчиках, робототехнічних інтенсифікаторах тощо Перший рівень структури управління заводом складається із локальних мікропроцесорних систем керування, які забезпечують формування інформації про хід технологічного процесу виробництва хлібо-макаронних виробів.

Локальні системи керування змонтовані безпосередньо біля апаратів, агрегатів, установок або технологічних ліній, що дозволяє отримати необхідну інформацію, її оброблення і передання на слідуєчий рівень управління заводом за допомогою мережі Fieldbus H1.

Таким чином, кожний із видів технологічного обладнання забезпечений локальними системами керування. При цьому обробка інформації, її представлення оператору виконується технічними засобами мікропроцесорної техніки, В АСУТП хлібозаводу виробничо-технічний комплекс (ВТК) оснащений сучасними інтелектуальними датчиками, локальними адаптивними цифровими системами з мікропроцесорними виконавчими механізмами. Інформація про стан ВТК передається на другий ієрархічний рівень управління заводом для представлення оператору і формування команд керування технологічними процесами. На першому рівні управління заводом реалізовано наступні функції АСУВ:

- вимірювання технологічних параметрів, оброблення і передача сигналів інформації на другий рівень управління;
- регулювання заданих значень технологічних параметрів;
- формування керованих впливів на виконавчі механізми (клапани, насоси, шнекові давальники, мішалки і т.п.)
- автоматичне керування за заданими алгоритмами окремими технологічними агрегатами, установками та лініями в цілому;
- збирання і передача на другий рівень управління сигналів про стан виконавчих механізмів, спрацювання систем захисту та блокування;

Відповідно функціям АСУВ, реалізованими на нижньому рівні ієрархії проєктанти вибирають технічні засоби автоматизації:

- вимірювальні перетворювачі, (датчики) технологічних параметрів, перетворювачі сигналів, сигналізаторів технологічних параметрів, адаптивні регулятори(контролери);
- виконавчі пристрої;
- електропускова апаратура;
- локальні мікропроцесорні пристрої(контролери для логіко –програмного керування и регулювання технологічних процесів), ПЗО, ПК.

Другий рівень управління хлібозаводом утворений системами, функцією яких є автоматизоване керування технологічними відділеннями та підрозділами відповідно інформації, одержаної від нижнього рівня управління. На другому рівні виконується координація керування технологічним та робототехнологічним обладнанням відділень, підрозділів та ліній, а також забезпечується узгоджене керування між ними за допомогою MES-систем.

На цьому рівні управління реалізуються наступні функції АСУВ:

- відображення оперативної інформації про значення технологічних параметрів і стан технологічного обладнання, а також позначених введених оператором команд й даних;
- формування та передача керованих впливів на виконавчі механізми;
- автоматичне керування за заданою програмою та командами оператора роботою технологічного обладнання, який знаходиться в технологічному відділенні або підрозділі;
- координування режимів роботи оператором відділень і підрозділів;
- реєстрації інформації про роботу технологічних відділів і підрозділів за допомогою друкованих пристроїв, а також її архіювання та збереження;
- збирання, оброблення та передача інформації про роботу технологічних відділень і підрозділів на третій рівень управління заводом.

Системи управління другого рівня загалом базуються на використанні програмно-технічних комплексів (ПТК) та інтелектуальних систем підтримки прийняття операційних рішень (ІСППОР), які включають базову ЕОМ, пристроїв зв'язку з об'єктом (ПЗО), відео термінали, друкувальні пристрої. локальні та мережеві мікропроцесорні пристрої (контролери), а також персональні ЕОМ, тобто автоматизовані робочі місця (АРМ) технолога.

Уся інформація необхідна для прийняття оперативних рішень щодо керування технологічним процесом відображається на кольорових моніторах та відео термінальних пристроях.

Введення команд, даних і регламентів (інструкцій) виконується оператором - технологом за допомогою клавіатури. Інформація про технологічні параметри і стан обладнання, команди керування передаються за рахунок пристроїв зв'язку з об'єктом у ПТК або від локальних мікропроцесорних пристроїв у ЕОМ або персональні ЕОМ (ПЕОМ) за рахунок персональної мережі ProfibusDP.

У випадку використання розподілених систем мікропроцесорних контролерів на хлібозаводах до другого рівня управління відносять мережеві контролери та ПЕОМ, які використовують АРМ технолога.

Третій рівень управління заводом з виробництва хлібо-макаронних виробів реалізує задачі стратегічного менеджменту, виробничого планування, бізнес-керування виробництвом продукції, портфелем замовлень, логістикою, енергоресурсами за допомогою цифрової платформи «ІЖА», MES-систем, ERP-системи, ІСППР та Промислового Інтернет речей (ІоТ).

На третьому рівні управління реалізуються наступні функції:

- управління портфелем замовлень смарт- продукції та виробничими можливостями підприємства - виробнича потужність (максимально можливий

випуск продукції за об'ємом і асортименту при оптимальному використанні обладнання, технологій, персоналу, площин). З метою узгодження потреби ринку та можливостей підприємства формується виробнича програма (план виробництва та реалізації продукції) на рік, квартал, місяць, декаду, добу.

- виробниче планування на базі систем MES та ERP охоплює наступні задачі:

- складання плану щодо виробництва, формування комплексного графіка виробництва, планування потреб в матеріальних ресурсах, детальне планування і управління виробництвом, облік ходу виробництва, управління виробництвом і диспетчерування.

- диспетчеризація режимів роботи технологічних ліній та узгоджене управління ними і координація їх взаємодії з постачальниками борошна та інших інгредієнтів з метою виробництва продукції високої якості

- донавчання баз даних, баз знань і реєстрація поточної та інтегрованої інформації про функціонування технологічних відділень і підрозділів в АСУ хлібозавода й підготовки сировини;

- надання інформації топ-менеджерам заводу про ринкову вартість підприємства, потоки грошей, навчання персоналу тощо

Для систем управління третього рівня характерним є використання ПТК і базової ЕОМ, призначених для операторських станцій, і забезпечення підтримки та маніпулювання достатньо потужними базами даних. В АСУ хлібозаводу великої потужності важливим є обмін інформацією як по горизонталі, між технологічними відділеннями і підрозділами, так і по вертикалі, між рівнями управління відділеннями та підрозділами. Тут ефективним є використання протоколів та інтерфейсів компонентів АСУВ локальної мережі, а також стандартних інтерфейсів зв'язку між мікропроцесорними контролерами, ПТК і ПЕОМ для промислових розподілених мереж вітчизняного виробництва, а головне для інформаційних мереж Ethernet та ПоТ.

Цікавим є досвід використання інтегрованих мікропроцесорних систем на хлібозаводах Фінляндії «Даматик ХДІ» Ця система вирішує наступні задачі: збирання та оброблення технологічної інформації, контроль і керування технологічними процесами, а також керування електродвигунами та клапанами, групове керування виконавчими механізмами, програмний запуск і блокування, відеографічне зображення динаміки технологічного процесу і роботи систем керування, друк рапортів та інформаційних режимних листів, організацію інформаційних зв'язків в самому підприємстві, що забезпечує розширення обчислювальних ресурсів для рішення нестандартних задач.

Апаратне оформлення системи на локальному рівні базується на мікропроцесорних станціях (сукупності контролерів). Кожна станція розрахована на 200 входів та виходів. Інформація від мікропроцесорних станцій (МС) передається в системну шину, максимальна довжина якої складає 2км коаксіального кабелю, протокол зв'язку, «tokenpassing». До системної шини підключені пристрої другого рівня: операторські станції, системи технологічної та аварійної сигналізації, станції виведення трендів та станції керування

рецептурами. Для представлення інформації персоналу обслуговування та керування станцією існують графічні телемонітори, сенсорна клавіатура, друкувальні та реєструючі пристрої. Для планування та управління хлібопекарним виробництвом передбачена спеціальна мікропроцесорна станція, яка підключена до системної шини. Мікропроцесорна система «DamaticXDI» дозволяє вирішувати задачі керування локальними системами, а також управляти хлібопекарським виробництвом і заводом в цілому. Система XDI- це розподілена система управління хлібозаводом, яка має потужні засоби автоматизації, починаючи з базових функцій керування і закінчуючи засобами інформаційного менеджменту як системи контролю та управління виробництвом і якістю продукції. Основне призначення системи – підвищення продуктивності та якості продукції за рахунок використання нових засобів представлення інформації виробничому персоналу.

Вченими ДонНУЕТ ім. М.Туган-Барановського (м. Кривий Ріг) накопичено значний досвід проектування адаптивних систем керування технологічними процесами виробництва «розумних» продуктів харчування для територій з високим рівнем техногенності [1,13]. Авторами розроблені типові АСУТП підприємств харчової промисловості, в яку вбудована цифрова платформа «ІЖА» та використана відкрита архітектура. Вона дозволяє виконувати інтеграцію з іншими системами, а також виконувати пошук і запобігання аварійних режимів у реальному часі та має доступ до мережі ПоТ, наприклад, розпізнає критичні аварійні виробничі ситуації, При цьому аварійні сигнали можливо автоматично передавати персоналу через радіотелефону мережу GSM. Відзнакою таких АСУТП є високий рівень роботизації нижнього рівня управління виробничими процесами, а також використання вбудованих в технологічний процес робототехнологічних інтенсифікаторів [48,49,50,52].

Розглянемо більш детально роботу оператора-технолога та топ-менеджера хлібозаводу. Інформація, яка надходить на монітор оператора-технолога, групується на відеокадрах по функціональній ознаці та відображається у вигляді фрагментів технологічних схем, графіків, таблиць, гістограм. Вона надається оператору за принципом « деталізація зверху вниз». В системі передбачені відеокадри, стандартні та мнемосхеми.

Стандартні відеокадри (вікна) включають:

- протокол подій (по системі в цілому, технологічним відділенням);
- таблицю операторного налагодження для кожного параметра;
- групові та одиночні тренди;
- доступ до системи;

- меню друкованих документів та інші відеокадри, у тому числі «оглядове табло», тобто узагальнений кадр системи (перший рівень деталізації): інформація про становище заводу поділена на технологічні дільниці, назва яких висвічується на відеокадрі; зміна кольору назв (зелений, жовтий, червоний) вказує на появу сигналізації на відповідній технологічній дільниці;

- «дільниця» (установка, агрегат), тобто другий рівень деталізації: інформація про стан параметрів однієї технологічної дільниці; при цьому всі її змінні умовно розділяються на функціонально зв'язані групи; зміна кольору



назви груп свідчить на появу сигналізації на відповідній технологічній ділянці;

- « група змінних» (третій рівень деталізації) - детальна інформація про технологічні змінні, при цьому передбачено їх виведення на екран монітора та мнемосхеми наступних динамічних елементів: поточні значення аналогової змінної в цифровій формі; стан дискретної змінної у вигляді написів «включ.», « відкл.», «відер.», «зачин.»; динамічного барграфа; динамічного елемента миготіння визначеного поля мнемосхеми; динамічної віртуальної клавіші, при натисненні на яку виникає перехід від поточної мнемосхеми по вибору на будь-яку іншу; динамічна область мнемосхеми, на якій висвітлюються різні «малюнки» в залежності від взаємного стану дискретних сигналів та інших логічних змінних, і багатьох інших.

В системі передбачено формування та відображення на моніторі, а також друкування « протоколу подій » - звітного документу, в якому в хронологічному порядку фіксуються всі події в системі; звітних документах довільної форми; « протоколів перед аварійного і після аварійного стану»

Для топ-менеджерів підприємства передбачено використання монітору корпоративної продуктивності (МКП). Оперативний персонал забезпечений персональним комп'ютером (ПК) та прикладними програмами, призначених для реалізації окремих функцій (наприклад, вимірювання параметра) або блоків функцій (наприклад, управління технологічною операцією)

Усі АРМ підключені до єдиної технологічної платформи, яка працює на базі потужного сервера При використанні цієї схеми електронного оброблення інформації організується багато користувальна робота з різними або одними й тими ж програмами та складом даних.

АРМ - це комплекс об'єднаних між собою технічних засобів, який забезпечений програмними засобами та здатний реалізувати закінчену інформаційну технологію.

В комплекс входять наступні модулі: процесор, дисплей, принтер, клавіатура. маніпулятор «мишка», плоттер, сканер, стример, обладнання для передачі даних. Програмними елементами АРМ є операційні системи, системи керування базами даних, пакети прикладних програм, спеціальні програми, графічні та тестові редактори, табличні процесори і т.п. Таким чином, мова іде про комплекс технічного та програмного забезпечення інструмента кожного користувача. Поняття АРМ охоплює проблеми від створення систем розподіленої обробки даних (з визначенням інформаційних рівнів) до рішення ергономічних питань ( розташування та склад технічних засобів, зручність користування ними тощо).

АРМ зближує користувача з можливостями сучасної інформатики та обчислювальної техніки й створює умови щодо роботи без посередника – професійного програміста. В цьому випадку гарантується автономна робота та можливості зв'язків з іншими користувачами в межах підприємства. Обов'язковою умовою ефективного використання автоматизованих робочих місць є наявність в ньому сервісної системи підтримки роботи користувача, яка включає програми навчання роботи на клавіатурі, правила захисту інформації

та звернення до носіїв, технологічні інструкції з прикладами проведення конкретних видів робіт. Основні функції АРМ оператора: контроль технологічних параметрів та керування програмно-логічними операціями ; керування регуляторами, клапанами, дискретними ВМ, протиаварійний захист, розрахунок узагальнених показників якості тощо.

Система відеокадрів АРМ оператора включає:

- оглядовий кадр з назвою вузлів та стадій ТП і сигналізацією їх стану щодо порушення регламенту та збуреннях роботи обладнання (кожний вузол відображається рядком на екрані з індикацією стану)

- кадр стану параметрів визначеної дільниці в табличній формі з шифрами параметрів, поточних значень та одиниць вимірювання.

- кадр стану визначеної групи регуляторів в графічній групі, який забезпечує керування завданням й ВМ (клапаном);

- тренди ( в графічній формі), відзеркалюють історію групи параметрів з можливістю масштабування по вісям, дозволяють оператору переглянути значення за указниками, виведення на друк інформації;

- мнемосхеми поточного стану технологічного вузла з можливістю керування регуляторами та дискретними ВМ;

- кадр керування, який віддзеркалює поточний стан і забезпечує керування алгоритмами програмно-логічного керування та операціями протиаварійного захисту (ПАЗ);

- бланки АСУТП з метою ознайомлення та друку режимних сторінок, протоколів аварійних ситуацій, спрацювання ПАЗ;

- діагностику поточного стану контролерів та каналів зв'язку;

- архів для ознайомлення та друку бланків АСУТП;

Програмне забезпечення (ПЗ) АРМ налагодження складається із наступних програм:

- 1) підготовки, трансляції, компоновці, завантаження, вивантаження і ретрансляції ППР контролера, контролю і керування змінними, зняття перехідних характеристик об'єкта з виведенням на друк;

- 2) розрахунок параметрів регуляторів за кривою розгону з ідентифікацією динамічної моделі;

- 3) розрахунок параметрів регуляторів ітераційним методом в режимі реального часу (РЧ) з замкненим контуром регулювання; шляхом розкочування контура, за 2-3 ітерації програма виконає налагодження з занесенням коефіцієнтів у пам'ять контролера;

Розглянемо функції деяких автоматизованих робочих місць.

Основні функції АРМ хіміка – аналітика:

- 1) прийняття та збереження аналітичних сигналів;

- 2) керування відбором проб та режимами роботи аналізаторів якості;

- 3) оброблення результатів у режимах градування та аналізу;

- 4) ручне введення та виведення в архів аналітичних даних;

- 5) формування звітних документів.

Основні функції АРМ - операторів:

1) моделювання об'єкта та САР, виконання функцій керування АРМ операторів;

2) налагодження програм щодо конкретного використання, навчання операторів-технологів керуванню ТП в умовах АСУТП на базі двох ПЕОМ, одна з яких виконує роль моделі об'єкта, а інша – АРМ оператора АСУТП, на якій оператор набуває навички керування ТП. ПЕОМ зв'язані між собою, наприклад, послідовним інтерфейсом RS-485. Обмін даними передбачає передачу керованих впливів від ПЕОМ навчання до ПЕОМ моделі та зворотно-від моделі розрахованих значень змінних. Виведенням керованих впливів оператор виконує з клавіатури ПЕОМ навчання, а збурених впливів-з клавіатури моделі. Крім цього, збурення може бути задано серією прямокутних імпульсів або синусоїдальною хвилею, випадковим чином. У процесі проектування АСУТП хлібозавода необхідно:

- оцінити кількість АРМ оператора та АРМ верхнього рівня (керівника зміни, керівників цехів) та АРМ топ-менеджерів ПАТ;
- оцінити необхідність сервісних АРМ (начальника, для навчання);
- число вхідних аналогових сигналів, контурів регулювання, вхідних дискретних сигналів стану, вихідних дискретних сигналів керування, контурів ПАЗ у системі; інформацію про характер ТП, наявність та число програмно-логічних операцій.

**Програмне забезпечення АСУТП.** Для сучасних автоматизованих комплексів (АТК), спроектованих на обчислювальних та мікропроцесорних засобах, важливою складовою є їх програмне забезпечення (ПЗ). Воно вирішує питання пов'язані з розробкою та експлуатацією програм для програмно-технічних комплексів (ПТК) та мікропроцесорних контролерів (ПМК і ПЛК).

Програмне забезпечення, за допомогою якого виконується розробка ПО, називають інструментальним. До його складу відносяться наступні програми: редактори, транслятори, компонувальники, налагоджувальники, бібліотекарі тощо

Якщо за допомогою інструментального ПЗ на ЕОМ з однією системою команд виконується розробка ПЗ з іншою системою команд, то таке інструментальне ПЗ називають кросовим.

Програмне забезпечення, яке одержане в результаті розробки та налагодження і призначене для рішення різних задач користувача, називають прикладним.

В обчислювальній системі завжди є місце системному ПЗ, яке забезпечує роботу апаратури (зовнішніх пристроїв, таймерів, УЗО тощо) та запуск прикладних програм.

Таким чином, ПЗ може бути використане в трьох основних режимах:

- розробка та налагодження ПЗ (інструментальне)
- рішення прикладних програм (прикладне)
- забезпечення роботи апаратури( системне)

В останній час значне використання знайшли спеціалізовані пакети ПЗ, які забезпечують розробку та експлуатацію прикладного ПЗ для визначення задач, а також для пультів - програма торів ПМК.

Програмне забезпечення останніх включає мову програмування простого рівня - міжнародного стандарту ІЕС-1131-3 тощо, а також утиліти роботи з постійними запам'ятовувальними пристроями (ПЗП) та оперативним запам'ятовувальним пристроєм (ОЗП), які забезпечують читання, запис, копіювання, редагування та перевірку.

Пульти – програматори складних ПМК ( у тому числі мережеві) мають розвинуте ПЗ. Воно складається із мов програмування низького рівня та мов програмування високого рівня ( VisualBasic, Фортран, СИ++ та ін.), які дають можливість значно прискорити процес розробки та налагодження прикладного ПЗ.

Велике значення мають персональні ЕОМ (ПЕОМ) щодо розробки ПЗ мікропроцесорних контролерів в режимі програма торів та кросовому режимі.

Розробка ПЗ для систем керування з використанням програмно-технічних комплексів (ПТК) більш складніший, так як має розвинутий набір пристроїв відображення та накопичення інформації. До них потрібно віднести алфавітно-цифрові і графічні монітори, які забезпечують відображення точної та оперативної інформації стану технологічних процесів, Пристрої друку дозволяють одержати документи звітності та контролюють параметри технологічних процесів, при чому в якості ПЗП використовують накопичувачі на жорстких та гнучких магнітних дисків. Однією із важливих проблем, які поставлені перед розробниками будь-яких комп'ютерних систем - раціональний вибір інструментального ПЗ, визначаючого технологію проектування, налагодження та супроводження системи, а відповідно, якість та вартість системи.

Коло задач, які необхідно розробити проєктантам АСУ, дуже широкий. До них відносяться задачі АСУТП, диспетчерських та інформаційних систем.

Задачі АСУТП й диспетчерських систем. Виділимо головні із них:

- Пошук та обробка технологічної інформації, взаємодія з робототехнологічними комплексами, контролерами, датчиками, вимірювальними приладами, ВМ;

- візуалізація ТП, технічна анімація, ЧМІ;

- автоматичне керування та регулювання;

- накопичення даних щодо історії роботи системи. презентація її у вигляді графіків, таблиць, звітів тощо.

Задачі АСУТП й інформаційних систем:

- організація потоків інформації в локальних та глобальних мережах;

- робота з локальними БД і серверами;

- створення клієнтських та серверних компонентів в архітектурі «клієнт-сервер, а також «клієнт-сервер» додатків- сервер даних;

- розвиток засобів введення і віддзеркалення даних (форми, сторінки, багатосторінкові та одно сторінкові діалоги);

- складне оброблення та аналіз даних ( статистика, кореляційний аналіз, моделювання), генерація звітів та інших документів.

Інструментальні засоби (ІЗ), використовуються при проєктуванні АСУ хлібозаводу з виробництва N- видів продукції. а отже N-видів бізнесів можна

розділити на ERP, MES, SCADA-системи, сервера БД універсальні системи програмування.

Основою сучасного виробництва програмних засобів є програмна інженерія (ПІн), яка включає в собі роботи щодо їх проєктування, реалізації, експлуатації та супроводження. До головних результатів ПІн, необхідних при розробці програмних систем (ПС), відносять уніфікацію процесів створення та експлуатації ПС; формування і підтримку ефективної організаційно-виробничої інфраструктури, можливість розробників в цілому зосереджений на функціональній стороні проєкту и т.п.

По функціональним можливостям існуючі SCADA-системи в цілому подібні. Технологія програмування близька до інтуїтивного поняття автоматизованого процесу, потужне об'єктивно-орієнтоване програмування, яке використовується в більшості цих пакетів, робить ці проєкти доступними щодо освоєння для широкого кола користувачів. Усі системи будемо вважати у визначеному ступені відкритими, які допускають можливість доповнення функціями власної розробки, що мають відкритий протокол для розробки власних драйверів, розвинену мережеву підтримку, можливість включення ActiveX-об'єктів та доступ до стандартних БД. Важливим фактором всіх SCADA-систем є кількість підтриманих ПЛК. Системи InTouch, FactoryLink, RealFlex, Genesis підтримують десятки і сотні драйверів, що робить їх лідерами по цьому показнику. Використання нових технологій в SCADA-системах, розробка інструментальних засобів комплексної автоматизації дозволяє проєктантам АСУТП хлібо заводів створювати високопродуктивні системи керування технологічними процесами нижнього рівня управління.

Сьогодні фірми-виробники інструментальних засобів концентруються в сфері MSWINDOWSNT, а так як загальні технічні можливості систем достатньо близькі, то головну увагу приділяють якості технічної підтримки та навчанню користувачів. Це забезпечує скорочення витрат системних інтеграторів і кінцевих користувачів щодо інжинірингу та менеджменту власних проєктів, зменшення вартості супроводження кінцевої системи. В теперішній час в черговий список систем підтримки технологій та інтерфейсів в додаток до вже відомих традиційних DDE, DLL, OLE, ODBC/ SGL додаються об'єктивні моделі COM/DCOM та ActiveX, технологія Java, універсальний інтерфейс зв'язку зі зовнішніми пристроями OPC, мови стандарту IEC 61131-3, мови опису на основі Visual Basic for Applications, Internet/ intranet тощо. Інструментальне ПЗ зводить основну частину розробки конкретного проєкту до параметризації (заповнення БД) та малювання відеограм. Цю роботу може виконати кожний користувач комп'ютера, який пройшов навчання. В той же час у багатьох випадках, щоб забезпечити необхідну розробку та функціонування пунктів керування АСУТП, необхідні програмісти як «системні», так і «прикладники», які вміють програмувати на традиційних мовах програмування. Повний набір необхідних функцій в конкретній системі керування не може бути забезпеченим лише базовим ПЗ (наприклад, розрахунок задач, алгоритми визначення команд керування з пульта оператора). В останній час намітилась тенденція вбудування в SCADA- програму

розвинутих мов програмування С або VBA, що повертає розробника системи до традиційних мов програмування. Організація багатofункціoнyвального пункту керування стала вимогою сьoгoднішнього часу. Розробники SCADA-програм рекомендують клієнт-серверну технологію: інформація збирається в сервері, до якого по ЛВЗ підключаються АРМ-користувачів. З'являється задача конфігурування на базі SCADA ПЗ сервера та АРМ, яка вимагає спеціальних навичків як програмування, так і адміністрування ЛВЗ. При створені БД параметрів на сервері для деяких SCADA -програм необхідно вказати мережеві адреси клієнтів, які мають доступ до того чи іншого параметру; для інших- на комп'ютері-клієнті створюється копія БД необхідних параметрів з перерахуванням мережевих адрес- джерел даних. Особливої уваги вимагає коректність мережевих та внутрішніх налагоджень кожного сервера та робочого місця. Передача даних в інші АСУ можливо виконати використанням стандартних технологій ODBC та SGL, які підтримують більшість – програм. При цьому використання ODBC та SGL гарантує взаємодію з будь-якою із БД. Користувачам SCADA- систем важливо знати функціональні та комунікаційні параметри і технічні характеристики систем, наприклад, можливості використання Промислового Інтернет-речей для здобуття потрібного формату щодо розробленої станції та без проблем вставити його в проєкт; топ-менеджерам підприємства- ввійти на екрани операторських станцій з метою оцінки роботи ділянок підприємства. Отже, інтеграція систем керування на всіх рівнях в межах підприємства забезпечується засобами інтегрованих програмних систем та комунікацій. При цьому важливу роль відіграють сучасні корпоративні інформаційні системи верхнього рівня управління хлібозаводом.

## **9.2. Задачі верхнього рівня управління в АСУ-АСУТІІ хлібозаводу з виробництва смарт-продуктів харчування**

Верхній рівень в ієрархії управління хлібозаводом виконує ключові аспекти його виробничої і комерційної діяльності, а саме: виробництво, планування, фінанси та бухгалтерія, матеріально-технічне забезпечення і управління кадрами, збут, управління запасами, створення БД замовлень на виготовлення (постачання) продукції та надання послуг.

Системи створюють з метою забезпечення керівництво підприємства інформацією для прийняття управлінських рішень, також для створення інфраструктури цифрового обміну даними підприємства з постачальниками та споживачами. Підприємства з виробництва смарт-продуктів харчування унікальні, тому що їх виробнича та фінансова діяльність направлені на забезпечення продуктами здорового харчування регіонів з техногенними територіями, школярів та воїнів ЗСУ. Тому на їх верхньому рівні управління використана концепція використання ERP-систем, цифрової платформи «ІЖА», ІСПП, MES-систем і технологій Промислового Інтернет- речей.

Такі системи орієнтовані на технології цифрового управління «віртуальним підприємством». Віртуальне підприємство, віддзеркалюючи взаємодію виробництва, постачальників та партнерів. використовує технології

цифрового керування та робототехніку на всіх рівнях, вирішує головне завдання – забезпечити споживачів смарт - продуктами харчування. На верхньому рівні завдяки ERP-MES систем, ІС додаються механізми управління цифровізацією продукції та усієї бізнес-моделі, включаючи електронну торгівлю та після продажне обслуговування, підвищення клієнтоорієнтованості, зміни в корпоративному управлінні та організаційній структурі підприємства, прискорення горизонтальної та вертикальної інтеграції ланцюжків створення вартості.[36]

Організаційно-економічна сфера управління хлібозаводом у цьому випадку буде використовувати «розумні» технології: інтернет-речей, штучний інтелект, смарт - пристрої, великі дані, хмарні технології, предикативну аналітику. Завдяки інтелектуалізації верхнього рівня впроваджуються інноваційні технології керування виробничою сферою, а саме: оптимізація роботи обладнання буде виконуватись в режимі реального часу (РЧ), скорочення операційних затрат, зниження ресурсомісткості та підвищення екологічності виробництва. Розробка смарт-продукції харчування буде спонукати топ-менеджерів підприємств до впровадження «розумних» технологій: інтернет-речей, смарт-пристроїв, робототехнологічні комплекси, інтелектуальне моделювання та візуалізація процесів усередині устаткування, концепція цифрових двійників, адитивні технології.

В наслідок подібних трансформацій менеджери підвищать якість життя співробітників хлібозаводу, умови праці та її безпека. Буде створена цифрова культура підприємства, а головне за рахунок роботизації та впровадження безлюдних технологій продукція хлібозаводів Придніпровського регіону буде відповідати стандартам країн ЄС. [36]

У процесі побудови цифрових систем верхнього рівня з ERP та MES – систем важливим аспектом є створення інформаційного забезпечення, необхідного для прийняття за допомогою ІСППР управлінських рішень.

Показником якості цієї інформації є її оперативність та об'єктивність. Оперативність дозволяє: своєчасно визначити вузькі та проблемні місця виробництва, забезпечуючи тим самим можливість оперативно впливати на процес; в реальному часі контролювати завантаження і технічний стан виробничого обладнання; керувати ключовими показниками виробництва не по нормативним, а по реальному поточному стану. Достовірність забезпечує: оптимізацію виробничих процесів на основі їх об'єктивного аналізу; підтримку заданих виробничих показників: продуктивність, якість продукції, собівартість; виключення людського фактору при рішенні облікових задач. Рішення всіх перелічених задач найбільш актуальне для підвищення ефективності АСУ верхнього рівня з ERP- системами та інтеграції їх з АСУТП за допомогою MES- систем. Останні орієнтовані на інформатизацію задач оперативного планування та управління виробництвом, оптимізації виробничих процесів та виробничих ресурсів, контролю і диспетчеризації виконання планів виробництва з мінімізацією затрат. Функції, які реалізовані в MES- системах, аналогічні методам керування в ERP- системах, але лише в інших часових масштабах та з іншими об'єктами управління. MES- це

автоматизована виконавча система виробничого рівня, яка доповнює та розширює функції ERP-систем. Використовуючи фактичні технологічні дані, MES-системи підтримують всю виробничу діяльність хлібозавода в режимі реального часу. Швидкий результативний відгук на зміни умов, в комбінації з орієнтацією MES на зниження витрат, допомагають ефективно управляти виробничими операціями та процесами. Крім того, MES-системи формують дані про поточні виробничі показники, необхідні для функціонування ERP-систем.

Таким чином, MES-системи-це зв'язана ланка між орієнтованими на фінансово-господарські операції ERP-системами та оперативної виробничої діяльності підприємства на рівні цехів, дільниць або виробничі лінії.

Звідси слідує (див. рис. 9.1), що інтегрована автоматизована система управління хлібозаводом великої потужності складається із трьох рівнів управління: верхній рівень управління ресурсами хлібозаводу (ERP); середній рівень- оперативне управління виробництвом (MES); нижній рівень- вирішує задачі керування за допомогою АСУТП та SCADA-систем технологічними процесами виробництва продукції. Відмітимо, що при передачі частини функцій управління від систем ERP у MES-системи на виробничий рівень (керівництву виробництва, цеха, виробничої дільниці, технологу, начальнику служби експлуатації, і т.п.), виконується раціональна сегментація контурів управління підприємством в цілому. У цьому випадку кожний контур управління характеризується своїм рівнем інтенсивності циркулюючої в ньому інформації, своїм масштабом часу та своїм набором функцій: 1) контур управління локальними системами та АСУТП (технологічний)- найбільш інтенсивний щодо об'єму інформації і жорсткий в часі по відношенню до реакції на збурення, яке може складати секунди, а інколи мілісекунди. У верхньому рівні шару АСУТП - в SCADA- системах проходить накопичення й оброблення інформації великої кількості технологічних параметрів. На цьому рівні створюється інформаційна база вхідних даних для MES- рівня. 2) контур управління рівня MES ( оперативно-виробничий) працює з отфільтрованою та обробленою інформацією, яка надходить від датчиків АСУТП, так і від інших служб виробництва,(заводської лабораторії, технологічних, планово-виробничих і т.п.).

Інтенсивність інформаційних потоків тут дещо низча та пов'язана зі задачами оптимізації заданих технологічних показників (якість продукції, продуктивність, енергозбереження, собівартість і т.п.) Типові часові цикли керування складають хвилини, години, зміни, доби. Оперативне керування в цьому контурі управління виконується спеціалістами, які більш детально, ніж топ-менеджери, володіють виробничою ситуацією (керівники виробничих цехів, дільниць, головні технологи, енергетики, механіки та ін..). У зв'язку з цим повинні підвищуватись якість та ефективність рішень, які приймають оператори - технологи в межах делегованих зверху повноважень.3) контур управління рівня ERP (стратегічний) звільняється в цьому випадку від рішення задач оперативного управління та забезпечує підтримку бізнес-процесів хлібозавода в цілому. Потік інформації від виробничого блоку стає



мінімальним та включає в собі агреговану управлінську і звітну інформацію за стандартами ERP з типовими часовими параметрами контролю (декада, місяць, квартал). а також сигнали, які вимагають безпосереднього втручання топ-менеджерів підприємства. В процесі розробки проєкту «Інтелектуальне підприємство» харчової промисловості проєктанти визначають MES- функції та засоби автоматизації експертним шляхом, з точки зору можливостей підвищення ефективності й рентабельності підприємства. MES-системи в цьому проєкті інтегровані з джерелом фізичних даних рівня АСУТП-програмованими-логічними контролерами (ПЛК), SCADA-системами та базами даних реального часу, з одного боку, а з іншого вони зв'язані з ERP - системами, що забезпечує системну інтеграцію всіх рівнів управління та інформаційної вертикалі підприємства. В процесі впровадження проєкту проєктанти прийшли до висновку, що MES- системи потрібні для розробки смарт - продукції, а також збільшення конкурентоспроможності підприємства за рахунок усунення прогалини між виробничим та адміністративним рівнями управління. Сучасне бізнес - виробництво смарт-продуктів буде підтримане верхнім рівнем, а саме: зв'язок з постачальниками та замовниками буде забезпечений системами SCM і CRM ; підвищення рівня власної операційної ефективності за рахунок ERP-систем; конкурентоспроможність підвищиться за рахунок впровадження PLM-систем (ProductLifecycleManagement- управління життєвим циклом виробу). Під цим терміном будемо розуміти- автоматизацію практично всіх видів роботи від розробки проєкту смарт-продукта до його збуту. Визначимо основні концепції PLM: 1) можливість універсального, безпечного та керованого способу доступу та використання інформації, яка визначає властивості смарт-продукції; 2) підтримання цілісності інформації, яка визначає смарт- продукцію, на протязі всього її життєвого циклу; 3) управління та підтримка бізнес-процесів, використовуваних при створенні, розподілу і використанню подібної інформації. На думку експертів PLM необхідно розглядати не лише, як підвищення інтелектуальної власності, а також можливість аналізувати проблеми виробництва смарт-продукції для регіонів з техногенними територіями. Використання « розумних » технологій на підприємствах харчової промисловості, яка у зв'язку з переорієнтацією на зарубіжні ринки збуту з більш жорсткими умовами виконання замовлень, змушена побудувати єдине інформаційне управлінське середовище за допомогою цифрової платформи «ІЖА», інтелектуальних систем, ERP-систем. Це дозволило топ-менеджерам підприємств галузі відстежувати стан виконання портфеля замовлень в режимі реального часу на всіх етапах виробництва - від надходження сировини (*борошна*) до відвантаження готової продукції, скоротити час ідентифікації продукції протягом технологічного процесу, автоматизувати облік використання обладнання та його простоїв, підвищити швидкість документального оформлення тощо. Експерти з корпоративного управління вважають, що за рахунок використання лише ERP- систем та Промислового Інтернет- речей в хлібозаводах галузі на 25% скоротиться час узгодження замовлень і на 35-40% підвищиться ефективність виробничого персоналу. Верхній рівень підприємства крім цього реалізує програму

автоматизації управління основними виробничими фондами В єдиній інформаційній системі хлібозаводу створена БД про виробниче обладнання підприємства та його обслуговування: від класифікації обладнання та обліку простоїв до закупівель запчастин для необхідних ремонтних робіт (програма смарт-ремонт). Одним з основних елементів інтелектуальної системи управління верхнім рівнем є автоматизований облік використання обладнання та його простоїв і організації процесу смарт - ремонту обладнання. В контролери інформаційної системи автоматично надходять дані про час роботи основного обладнання, а майстри дільниць вносять інформацію про причини простоїв в контролери з мобільних пристроїв. Контур управління основними виробничими фондами постійно поповнюється новою інформацією та розширює можливості роботи користувачів, щодо керування завантаженістю виробничих технологічних ліній і зменшення простоїв виробничого обладнання.[36]

Впровадження технологій інтелектуального управління хлібозаводами спонукають до широкого використання датчиків для контролю роботи обладнання, які на основі вбудованих нейронних мереж виявляють проблемні ситуації та виконують оптимізацію споживання сировинних ресурсів, підвищення точності розпізнавання проблемних ситуацій щодо технологічного процесу всередині агрегатів тощо. Зібрана інформація інтерпретується штучним інтелектом, що дозволяє змодельовати виробництво хлібобулочних та макаронних виробів для населення, що мешкає на забруднених територіях та воїнів ЗСУ за допомогою концепції цифрових двійників [36].

Цифрова платформа «ІЖА» використовує також інформаційно-комунікаційні технології та Промисловий інтернет речей. Інтернет речей дозволяє у режимі реального часу керувати технологічними процесами хлібозаводу та зв'язувати на великій території воєдино всі його дільниці, дистанційно керувати роботою будь-якого пристрою та обладнання, підімкненими до MES систем. та АСУТП. Ефективне використання такого способу керування безлюдним виробництвом смарт - продукції є можливим лише за безперебійної роботи швидкісного Інтернету, до якого підключено відповідні смарт - пристрої, на всій території регіону, яку охоплюють закупівля сировини та будь-якої необхідної техніки й технології, виробництво, збут та утилізація не використаної продукції. На підприємствах харчової промисловості постійно працює Інтернет з максимальною швидкістю ширококутового з'єднання з мережею 100 М біт/с. і вище, але в процесі збуту продукції не вся територія регіону (особливо сільська місцевість) має таке покриття. Тому таку «розумну» технологію збуту продукції експерти рекомендують використовувати в місті поступово, розширюючи її на всю територію регіону. Розробка принципово нових продуктів харчування для задоволення вимог клієнтів також вимагає від проєктантів застосування робототехнологічних комплексів та робототехнічних інтенсифікаторів, мікропроцесорних систем керування, що відповідає концепції смартизації та є складовою четвертої промислової революції.

### **Контрольні запитання:**

1. Поясніть принцип проектування автоматизованих систем керування виробництвом смарт-продукції харчування.
2. Від яких параметрів АСУТП залежить вихідні показники підприємства.
3. Класифікація задач оптимізації
4. Поясніть принцип проектування автоматизованого робочого місця (АРМ) оператора – технолога.
5. Основні функції АРМ хіміка – аналітика
6. Основні задачі програмного забезпечення АСУТП виробництва продукції.
7. Поясніть зміст та сфери застосування MES та ERP-систем.
8. Поясніть термін «якість інформації»
9. В чому полягають основні концепції PLM- систем.
10. У чому особливість елементів інтелектуальної системи управління верхнім рівнем і автоматизованого обліку використання обладнання та його простоїв і організації процесу смарт - ремонту обладнання.

## **ЧАСТИНА 2.**

### **АВТОМАТИЗАЦІЯ ДИСКРЕТНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ**

#### **Тема 10. Проектування систем автоматизації технологічних процесів**

##### **10.1. Етапи проектування та склад проектної документації**

Основним завданням систем автоматизації технологічних процесів є визначення доцільного рівня та обсяг автоматизації. Проектна документація на системи автоматизації виробничих процесів виконується відповідно до державних та галузевих стандартів.

Проекти систем автоматизації виконуються на основі завдання на проектування, яке складається замовником. Завдання на проектування повинно містити такі дані: найменування підприємства; підставу для проектування; перелік відділень, цехів, апаратів та агрегатів, що автоматизуються; етапи проектування, технологічні схеми виробництва за окремими видами продукції з переліком основного обладнання та комунікацій; номенклатуру параметрів, що контролюються та регулюються із зазначенням їх номінальних значень та допустимої точності вимірювання; показники якості за кожним параметром, що регулюється (час регулювання, максимальне динамічне відхилення, ступінь згасання); креслення виробничих приміщень із зазначенням місця розташування технологічного обладнання та комунікацій, а також щитів і пультів управління; схеми енергопостачання та управління електроприводів; схеми водопостачання та повітропостачання; особливі умови (вибухо- та пожежонебезпека приміщень та ін.).

Проектування систем автоматизації проводиться у два етапи: технічний проект та робоча документація. Для об'єктів із простим технологічним процесом або з повторним використанням індивідуального проекту, проектування проводять в одну стадію.

Технічний проект повинен містити таку документацію: схеми автоматизації технологічних процесів, плани розташування щитів, пультів та засобів обчислювальної техніки; заявочні відомості приладів та засобів автоматизації, засобів обчислювальної техніки, щитів, пультів, електроапаратури, монтажних виробів та ін.; пояснювальну записку.

На стадії виконання робочих креслень здійснюють уточнення та деталізацію рішень. На цій стадії розробляють принципи електричної та пневматичної схем контролю, автоматичного регулювання, управління, сигналізації та живлення; загальні вигляди щитів та пультів; схеми зовнішніх електричних та трубних мереж; замовлені специфікації приладів, засобів автоматизації та обчислювальної техніки, електроапаратури, монтажних матеріалів тощо.[5]

Для скорочення термінів проектування, зниження його вартості та підвищення якості проектної документації використовуються системи автоматичного проектування (САПР) систем автоматизації. При цьому під

САПР мають на увазі набір обчислювальних програм для ЕОМ, які забезпечують розв'язання завдань на різних етапах проектування. Наприклад, розрахунок елементів і засобів автоматизації, аналіз і синтез АСР, часткове оформлення графічного та текстового матеріалу проекту.

## 10.2. Схеми автоматизації технологічних процесів

Схема автоматизації (СА) є основним технічним документом, що відображає технічні рішення з автоматизації конкретних технологічних процесів та оснащення їх приладами й засобами автоматизації. Під час розробки СА вирішують питання отримання інформації про стан об'єкта управління; контролювання, вимірювання, реєстрацію та сигналізацію технологічних параметрів процесу; регулювання, управління обладнанням; розміщення засобів автоматизації на щитах, пультах та технологічному обладнанні. Під час проектування СА враховують сучасний рівень автоматизації технологічних процесів галузі, характер технологічного процесу, умови пожежо- та вибухобезпеки, токсичність та агресивність навколишнього середовища; параметри та фізико-хімічні властивості середовища, що вимірюється; відстань від місць розміщення первинних вимірювальних перетворювачів та виконавчих механізмів до щитів та пультів управління й контролю; необхідну точність і швидкодію засобів автоматизації.[5]

У СА повинні використовуватися засоби автоматизації, що випускаються серійно; слід прагнути до застосування уніфікованих систем ДСП. Кількість приладів, апаратури управління та сигналізації, що встановлюються на щитах та пультах, має бути обмеженою. Під час проектування СА необхідно передбачити можливість нарощування функцій управління всистемі.

СА, в основному, виконується для кожної структурної ділянки виробництва окремо та містить машинно-апаратну схему технологічного процесу, на якій за допомогою умовних позначень зображуються органи управління, прилади та засоби автоматизації, що визначають основні принципи побудови системи автоматичного контролю та управління, а також взаємозв'язки між ними. У верхній частині креслення СА зображують машинно-апаратну технологічну схему. Технологічне обладнання зображується спрощено, умовно, контурами основних вузлів. Ця схема за своїм розташуванням повинна відповідати машинно-апаратній технологічній схемі із зображенням основних комунікацій, органів управління, електроустаткування та допоміжних пристроїв. Другорядні деталі можна випускати. Зображення технологічного обладнання разом із трубопроводами повинне давати повне уявлення про технологічну схему дільниці виробництва, яка автоматизується. Внутрішні деталі та елементи технологічного обладнання зображують тільки в тому випадку, якщо необхідно показати контакт із ними приладів і засобів автоматизації. Комунікації технологічних трубопроводів зображують залежно від середовища в трубопроводі. Розшифровування умовного позначення середовища дається на полях креслення СА. Якщо на кресленні є кілька трубопроводів з однаковим середовищем, але з різними характеристиками, то

до основного цифрового позначення можна додати літерний індекс. У розривах проставляють числовий шифр продукту, що тече по трубопроводах, відповідно до чинного ГОСТ 14202-69 (табл.10.1.), наприклад: вода тепла – 1т, вода гаряча – 1г, вода холодна – 1х тощо.

**Таблиця 10.1.**

**Умовні та цифрові позначення трубопроводів для рідини та газу[5].**

Середовище в трубопроводі	Умовне позначення	Колір
Рідина чи газ, що переважають у проєкті	Суцільна лінія	Червоний, чорний
Вода	— 1 — 1 —	Зелений
Пара	— 2 — 2 —	Рожевий
Повітря	— 3 — 3 —	Блакитний
Азот	— 4 — 4 —	Темно-жовтий
Кисень	— 5 — 5 —	Синій
Інертні гази:		
аргон	— 6 — 6 —	—
неон	— 7 — 7 —	—
гелій	— 8 — 8 —	Фіолетовий
криптон	— 9 — 9 —	—
ксенон	— 10 — 10 —	—
Аміак	— 11 — 11 —	Сірий
Кислота (окислювач)	— 12 — 12 —	Оливковий
Луг	— 13 — 13 —	Сіро-коричневий
Масло	— 14 — 14 —	Коричневий
Рідке паливо	— 15 — 15 —	
Горючі і вибухонебезпечні гази:		
водень	— 16 — 16 —	—
ацетилен	— 17 — 17 —	Жовтий
фреон	— 18 — 18 —	—
метан	— 19 — 19 —	—
етан	— 20 — 20 —	—
етилен	— 21 — 21 —	—
пропан	— 22 — 22 —	Оранжевий
пропілен	— 23 — 23 —	—
бутан	— 24 — 24 —	—
бутилен	— 25 — 25 —	—
Протипожежний трубопровід	— 26 — 26 —	Червоний
Вакуум	— 27 — 27 —	Світло-сірий

Напряж потоку рідини чи газу показують стрілкою. На лініях перетину трубопроводів, що зображують їх з'єднання, ставиться крапка. Відсутність крапки означає відсутність з'єднання трубопроводів.

На технологічних трубопроводах зображують тільки основну регулюючу й запірну арматуру, яка належить до сфери функціонування та обслуговування систем автоматизації, а також ту, що необхідна для визначення відносного розташування пристроїв.[5]

Прилади та засоби автоматизації зображують із використанням ГОСТ 21.404-85Д. Графічні умовні позначення засобів автоматизації виконуються за наступним принципом. У верхній частині кола, що позначає технічний засіб, проставляються літерні позначення вимірюваної чи регульованої величини та функціональної ознаки приладу, у нижній частині – позиційне позначення приладу чи компонента засобу автоматизації (рис.10.1).

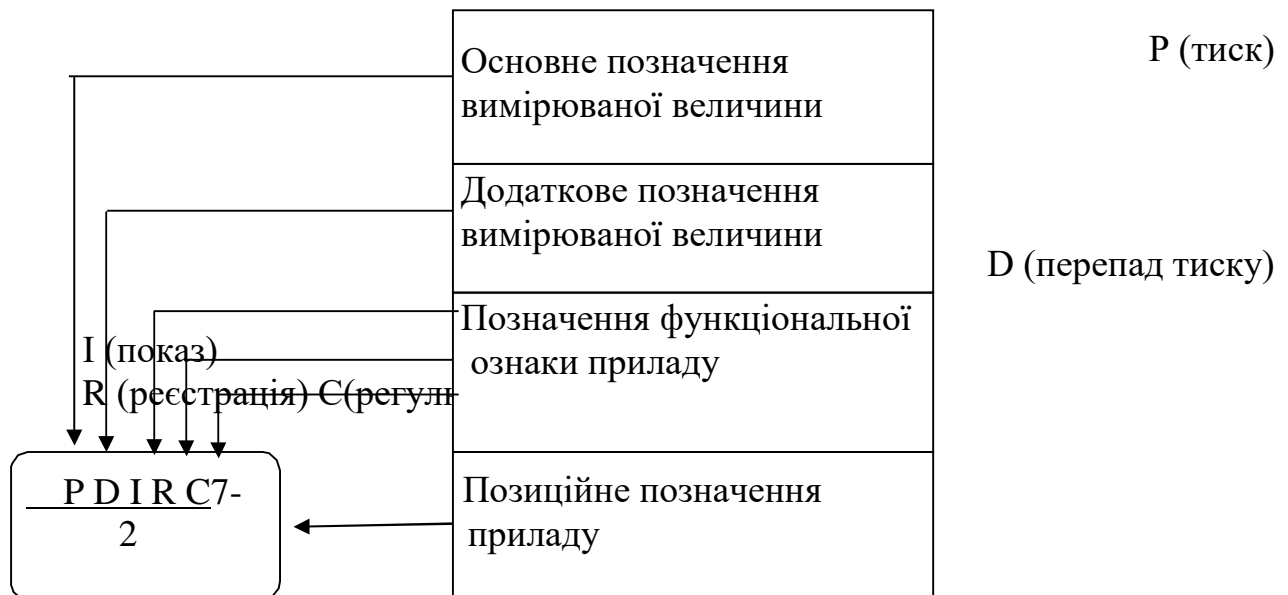


Рисунок 10.1. – Умовне зображення приладу для вимірювання, реєстрації та автоматичного регулювання перепаду тиску[5].

Літерні позначення проставляються в такій послідовності: позначення основної вимірюваної чи регульованої величини; позначення, що уточнює (якщо це необхідно) основну вимірювану чи регульовану величину; додаткові умовні позначення; позначення функціональної ознаки приладу (рис. 10.2). Як видно з рис. 14.2, одна й та сама літера може мати різне змістове навантаження, якщо вона знаходиться в різних місцях у позначенні приладу. Якщо прилад виконує кілька функцій, то розташування мірних позначень функціональних ознак має бути таким: I, R, C, S, A. Позначення пристроїв, призначених для ручних операцій, повинні починатися з літери «Н».

Слід мати на увазі, що, користуючись умовними позначеннями приладів згідно з ГОСТ 21.404-85, необхідно звертати увагу не тільки на символ літерного позначення, а й на місце його розташування в позначенні приладу.

Якщо один прилад виконує кілька функцій, то розташування літерних позначень функціональних ознак має бути таким: I R C S A. Наприклад, прилад для вимірювання температури із сигнальним пристроєм, що показує, реєструє, правильно позначати так: T I R A.[5]

Порядок розташування функціональних літер змінювати не можна. Позначаючи функціональні ознаки приладів, указують не всі, а лише ті з них, які використовуються в даній схемі (табл. 10.2).

Зображаючи деякі прилади та засоби автоматизації, необхідно зазначити додаткову інформацію, а саме:

1. При позначенні приладів, які виконують функцію сигналізації, граничні значення величин, що сигналізуються, слід конкретизувати додаванням літер «H» (найвище значення) та «L» (найнижче значення), які проставляються праворуч від графічного зображення приладу.

2. Для конкретизації вимірюваної величини, позначеної, наприклад, літерою «Q» чи «E», праворуч від зображення приладу необхідно зазначити найменування чи символ вимірюваної величини, наприклад: напруга, сила струму, рНтощо.

3. Якщо використовується літера «U» для позначення приладу, що вимірює кілька різнорідних величин, докладне розшифрування цих величин має бути наведене поруч із зображенням приладу або на полі креслення.

4. Написи умовних позначень перетворювачів сигналів та обчислювальних пристроїв, що розшифровують вид перетворення чи операції, які виконуються обчислювальним пристроєм, слід робити праворуч від графічного позначення приладу. Основні позначення перетворювачів сигналів та обчислювальних пристроїв:

Рід енергії сигналу:

- електричний –E;
- пневматичний –P;
- гідравлічний – С. Вид формисигналу:
- аналоговий –A;
- дискретний –D.



**ПОЗНАЧЕННЯ ВИМІРЮВАНИХ ВЕЛИЧИН**  
**Основне значення першої літери**

D – густина
E – будь-яка електрична величина
F – витрата
G – розмір, положення, переміщення
H – ручний вплив
K – час, часова програма
L – рівень
M – вологість
P – тиск, вакуум
Q – величина, що характеризує якість, склад концентрацію тощо
R – радіоактивність
S – швидкість, частота
T – температура
U – кілька різних вимірюваних величин
V – в'язкість
W – маса
X – нерекомендована резервна літера

**Додаткові позначення (друга літера), що уточнюють значення першої**

S – різниця, перепад
F – співвідношення, частка, дріб
I – автоматичне перемикання, обсяг
Q – інтегрування, підсумовування за часом

**ДОДАТКОВІ УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ**

E – первинне перетворення (чутливий елемент)
T – проміжне перетворення (дистанційна передача, у тому числі прилади з дистанційною передачею)
K – станція управління та прилади, що мають станцію управління
Y – перетворення, обчислювальні функції

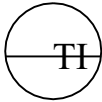
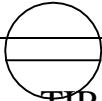
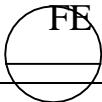
**ПОЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІЙ, ЩО ВИКОНУЮТЬСЯ ПРИЛАДОМ**

<b>Відображення інформації</b>
A – сигналізація
I – показ
R – реєстрація
<b>Формування вихідного сигналу</b>
C – регулювання, управління
S – вмикання, вимикання, перемикання



Рисунок 10.2. – Літерні позначення вимірюваних величин і функцій, що виконуються приладом[5].

**Таблиця 10.2.**  
**Приклади побудови умовних позначень окремих приладів та засобів автоматизації [5].**

№ з/п	Характеристика приладу	Позначення
1	2	3
1	Первинний вимірювальний перетворювач для вимірювання температури, установлений за місцем. Наприклад: термopара, термометр опору, манометричний термометр тощо	TE
2	Прилад для вимірювання температури показувальний, реєструвальний, установлений на щиті. Наприклад: логометр, мілівольтметр, манометричний термометр	
3	Прилад для вимірювання температури показувальний, реєструвальний установлений на щиті. Наприклад: автоматичний міст, автоматичний потенціометр	
4	Прилад для вимірювання тиску показувальний, установлений за місцем. Наприклад: манометр, вакуумметр тощо	PI
5	Прилад для вимірювання перепаду тиску безшкальний, із дистанційною передачею показань, установлений за місцем. Наприклад, дифманометр з дистанційною передачею	PDT
6	Прилад для вимірювання тиску показувальний, із контактним пристроєм, установлений за місцем. Наприклад, реле тиску	PIS
7	Первинний вимірювальний перетворювач для вимірювання витрат, установлений за місцем. Наприклад: діафрагма, ротаметр, сопло, датчик індукційного витратоміра тощо	
8	Прилад для вимірювання витрат показувальний, установлений на щиті. Наприклад, індукційний витратомір	FI
9	Первинний вимірювальний перетворювач для вимірювання рівня, установлений за місцем. Наприклад: датчик ємнісного, електричного, поплавкового, буйкового, п'єзометричного рівнеміра тощо	LE

Продовження табл. 10.2.

1	2	3
10	Прилад для вимірювання рівня, безшкальний, сигналізувальний, установлений за місцем. Наприклад, ємнісний сигналізатор верхнього та нижнього рівнів	H LA  L
11	Первинний вимірювальний перетворювач для вимірювання якості продукту, установлений на щиті. Наприклад, датчик рН-метра	$\begin{matrix} \text{PH} \\ \text{QE} \end{matrix}$ 
12	Прилад для вимірювання кількох різнорідних величин реєструвальний, установлений за місцем. Наприклад, самописний дифманометр-витратомір з додатковим записом тиску	$U=f(F,P)$ UR
13	Перетворювач сигналу, установлений на щиті. Вхідний сигнал електричний, вихідний – пневматичний. Наприклад, електропнеumo-перетворювач	E/P EY
14	Обчислювальний пристрій, що виконує операцію добування кореня. Наприклад, під час вимірювання витрат	EY
15	Нормувальний перетворювач, що забезпечує передачу інформації на ЕОМ, установлений на щиті	$B_i$ EY 
16	Прилад для управління процесом за часовою програмою, установлений на щиті. Наприклад: КЕП, багатомережне реле часу	KS
17	Пускова апаратура для управління електродвигуном. Наприклад: магнітний пускач (про використання резервної літери слід зауважити на полі схеми)	NS
18	Апаратура, призначена для ручного дистанційного управління, установлена на щиті. Наприклад: кнопчна станція, задавач тощо	
19	Ключ управління, призначений для вибору управління, установлений на щиті	HS

Для позначення величин, не передбачених зазначеним стандартом, можна скористатися резервними літерами латинського алфавіту, що не беруться для позначення першої літери. Величини, що використовуються багаторазово,

треба позначати однією й тією самою резервною літерою. Резервні літерні позначення слід розшифрувати на схемі.

У нижній частині кола, що символізує пристрій, наноситься його позиційне значення, яке служить для нумерації пристрою згідно із замовленою специфікацією проєкту. Усі засоби автоматизації та їх складові частини нумеруються. Нумерацію виконують зліва направо по схемі з використанням подвійних арабських цифр. Перша цифра в позиційному позначенні приладу є порядковим номером даного комплекту на схемі, а друга – номером елемента в комплекті.

Нумерація елементів виконується в послідовності руху інформації в контурі від первинних перетворювачів до регулювальних органів, наприклад 1-1, 1-2, 1-3 і т.д. Позиційне позначення наноситься в нижній частині кола, що символізує пристрій. Для позиційного позначення електротехнічних засобів можуть використовуватися спеціальні літерні коди, що застосовуються в електричних схемах, основні з яких наведені в табл. 10.2.[5]

У нижній частині поля креслення у вигляді прямокутників зображують місцеві прилади, щити та пульти управління. Вони розташовуються у двох горизонтальних прямокутниках, що мають назви: «Прилади місцеві» (верхній прямокутник) та «Прилади на щиті» (нижній прямокутник). У прямокутнику

«Прилади місцеві» зображують усі засоби системи автоматизації, розташовані в місцевому щиті, а також на панелях, розміщених у безпосередній близькості від технологічного обладнання на стінах, колонах тощо. Це вторинні прилади, магнітні пускачі, кнопкові станції. У прямокутниках щитів зображують усі прилади та засоби автоматизації, встановлені на лицьовій панелі та всередині щита. Це перетворювачі, регулятори, апаратура управління та сигналізації.

Взаємозв'язки між окремими приладами показуються суцільними лініями, які слід проводити з найменшою кількістю перегинів та перетинів між собою. Підведення лінії зв'язку до графічного символу приладу дозволяється зображувати в будь-якому місці кола (зверху, знизу, збоку).

Відбірковий пристрій для всіх постійно підключених приладів (манометри, газосигналізатори тощо) не має спеціального позначення. У цьому разі зображується лише лінія зв'язку, що з'єднує трубопровід або апарат, звідки відбирається імпульс із первинним вимірювальним перетворювачем чи приладом. У разі необхідності точне місце розташування відбіркового пристрою або точки вимірювання всередині апарата на кінці лінії зв'язку зображується у вигляді кола діаметром 2 мм. На з'єднувальних лініях біля прямокутників щитів проставляється максимальне робоче значення вимірювальної величини.

У процесі виконання складних СА технологічних процесів для запобігання великій кількості перетинів лінії зв'язку обривають та нумерують. Кінці ліній зв'язку нумеруються однією й тією самою цифрою, що зветься адресою. З боку щитових приладів кінці ліній зв'язку слід нумерувати цифрами в порядку зростання зліва направо.

На всі засоби автоматизації, що використовуються у СА, складається

специфікація, у якій зазначається найменування пристрою, його нумерація на СА, тип, марка, кількість тощо. Специфікація є складовою частиною проєкту автоматизації.

### **10.3. Принципові електричні схеми**

Принципові електричні схеми відбивають принцип дії систем автоматичного контролю, регулювання сигналізації та управління, визначають склад елементів схеми та взаємодію між ними, а також способи живлення приладів та засобів автоматизації. На основі принципових схем розроблюються монтажні схеми, креслення фасадів щитів, схеми зовнішніх з'єднань та інші матеріали проєкту автоматизації, складаються специфікації електроапаратури. Під час складання принципових електричних схем слід дотримуватися правил: елементи приладів та пристроїв, що діють у різних колах, розташовують незалежно від їх конструктивного зв'язку відповідно до логічної дії схеми; контакти та інші перемикаючі пристрої зображують у нормальному положенні, тобто за відсутності в колі струму; кожному приладу, який застосовується в схемі, надається умовне літерне позначення, що розповсюджується на всі його елементи, зображені на схемі; із застосуванням у схемі декількох однотипних елементів до літерного позначення додається арабська цифра (наприклад: реле К1, К2, К3, та їх контакти К1.1, К1.2, К2.1 тощо); принципові електричні схеми обов'язково повинні містити схеми силових кіл та управління, регулювання, вимірювання, сигналізації, живлення; силові кола змінного струму маркують літерами, що позначають фази (А, В, С, N).[5]

### **10.4. Проєктування систем автоматизованого керування дискретними виробництвами на підприємствах харчової промисловості**

Для керування дискретним виробничими процесами на підприємствах харчової промисловості(ХП) необхідно створити нову філософію, новий метод автоматизованого керування, що складається із трьох основних компонентів: оброблення в режимі реального часу інформації в спеціальному терміналі, головному терміналі (диспетчерський пульта керування) і каналів зв'язку. Такі інтегровані системи повинні бути тісно ув'язані з корпоративними системами менеджменту бізнес-процесів (MES і ERP-системи), а, отже, забезпечувати реальну і ефективну автоматизацію виробничих, економічних і технологічних процесів, керування підприємством, оперативного одержання, зберігання і аналізу інформації, створення єдиної інформаційної системи. Наскрізь пронизуючи усі підрозділи підприємства ХП, і зв'язуючи їх в єдиний механізм, система повинна одержувати точну, достовірну інформацію на всьому шляху виробництва від підготовки сировини (виробництво цукрового буряка) до його логістики. При цьому в таких АСУТП можливий доступ з кожного комп'ютера підприємства до інформації, що надходить від виробничого технологічного процесу, від кожної підсистеми. Такі АСУТП є сучасною необхідністю у керуванні складними технологічними процесами,

розташованими на значній території і віддаленими один від одного до п'яти кілометрів і сотень метрів.

Сьогодні до новітніх систем керування менеджери підприємств пред'являють вимоги не лише щодо максимізації продуктивності і мінімізації ціни на вхідну сировину, але і постійної адаптації до процесів корпоративного переозброєння технологій виробництва цукру з цукрових буряків, їх транспортування [3, 5].

Разом з цим сучасні АСУТП дискретних процесів повинні мати наступні характеристики:

1. Гнучкість – це можливість модифікації системної архітектури.

2. Масштабність системи. Це означає, що розроблений проєкт можливо опробувати на одному комп'ютері або маленькій мережі, а потім розширити систему (у відповідності з програмою розвитку, бюджетом і т.п.) без заміни обладнання, програмного забезпечення і системної конфігурації.

3. Відкритість архітектури, тобто підтримка відкритих технологій, стандартів і обладнання. Це дозволяє в процесі розвитку нових технологій постійно модернізувати і масштабувати цю систему силами своїх спеціалістів без глобальних змін системи.

4. Резервування – тобто механізм повного і багатократного резервування з використанням розподіленого оброблення даних у мережі, що надає користувачу значну гнучкість у розвитку системи автоматизації об'єктів підприємства ХП. Висока продуктивність визначається тим, що сучасні АСУТП повинні бути побудовані на базі мультизадачного ядра реального часу і працювати з великими об'ємами даних, а при збільшенні кількості параметрів час відзвучу змінюється незначно. Тобто за одну секунду підсистема АСУТП може вести опитування у мережевому режимі декількох проблемних ситуацій, завдяки станцій керування, розташованих на ділянках підприємства. Система захисту від несанкціонованого доступу в систему: АСУТП – реалізована на базі пароліної системи і дозволяє організувати в системі групи користувачів з різними правами під час роботи із нею.

5. Підключення до зовнішніх систем. АСУТП повинні підключатися до таких комп'ютерних систем, як DECPDP / VAX / Alpha, IBMAS400, UNIX, SUN. В системі повинні бути використані драйвери введення / виведення. Всі ці драйвери 64-розрядні і забезпечують підключення пристроїв більш ніж 300 типів: ПЛК, RTU, мікроконтролери, контролери контурів регулювання, елементи розподілених систем, вагові пристрої, лабораторні аналізатори, аналізатори вмісту цукру і т.п.

6. Сучасні АСУТП дискретних виробництв повинні керуватися операторами-диспетчерами.

7. Диспетчерські пункти (цехів) повинні забезпечувати виконання наступних функцій:

- прийом інформації про контрольовані технологічні параметри від контролерів нижніх рівнів і давачів;
- збереження прийнятої інформації в архівах;

- графічне зображення перебігу технологічного процесу, а також архівної інформації в зручній для сприйняття формі;
- сприйняття команд операторів і передача їх в адрес контролерів нижнього рівня і виконавчих механізмів;
- реєстрація подій, пов'язаних з технологічним процесом і діями обслуговуючого персоналу;
- оповіщення експлуатаційного і обслуговуючого персоналу про виявленні аварійних подій, пов'язані з контрольованим технологічним процесом і функціонуванням програмно-апаратних засобів АСУТП із реєстрацією дій персоналу в аварійних ситуаціях;
- довільне відображення архівної інформації з можливістю одночасного зображення у різних формах і декількох екземплярах з метою порівняння.

Наведений вище перелік функцій не є абсолютно повним і залежить від особливостей АСУТП конкретного підрозділу (цеху, фабрик) підприємства ХП

Диспетчер в багаторівневій автоматизованій системі керування технологічними процесами одержує інформацію з монітора ЕОМ або з електронної системи відображення інформації і впливає на об'єкти, що знаходяться від нього на значній відстані за допомогою телекомунікаційних систем, контролерів, інтелектуальних виконуючих механізмів.

Основним елементом ефективного диспетчерського керування є робота з інформацією, тобто процеси збирання, передачі, обробки, відображення і представлення інформації. Розглянемо роботу дискретних систем керування на прикладі проектування АСУТП цукрового заводу.

Від диспетчера, що керує комплексом збирання буряків,, транспортуванням автосамоскидами, транспортування бурякадоскладу (конвеєрними лініями) і, технологічним стадійним подрібненням буряка і його переробку у вигляді рідиної гетерогенної системи, вимагаються знання не лише процесу управління, але і досвід роботи з інформаційними системами, вміння приймати рішення (у діалогі з ЕОМ) у нештатних і аварійних ситуаціях і багато інше. Диспетчер стає головною діючою особою у керуванні технологічним процесом. Якщо вести мову про диспетчерське керуванні технологічних процесів на підприємствах ХП, то потрібно звернути увагу на проблему технологічного ризику.

Технологічні процеси на цукрових заводах є потенційно небезпечними, а при виникненні аварій приводять до людських жертв, а також до значних матеріальних і екологічних збитків. В основі кожної аварії (аварійної ситуації) лежить помилка людини. До цих помилок спонукають і відсутність новітніх систем контролю параметрів, відсутність надійних комп'ютерних систем керування, методів побудови ефективного людино-машинного інтерфейсу, орієнтованого на диспетчера, низький рівень автоматизації та контролю. Отже, вимоги підвищення надійності систем диспетчерського керування (у разі) є однією із причин появи нового покоління систем, орієнтованого на оператора-диспетчера.

Концепція SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition – диспетчерське

управління і збирання даних) визначена усім розвитком систем керування і результатом науково-технічного прогресу. До 1990 років більшість SCADA-пакетів використовувалися, як правило, для створення інтерфейсу оператора і реєстрації даних виробничого процесу. З появою пакетів SCADA нового покоління фірми (компанії), що займаються промисловою автоматизацією, відділи АСУТП на підприємствах і компанії – системні інтегратори одержали можливість використання на практиці величезного потенціалу, що є в цих пакетах.

Перше і саме головне, SCADA-пакетів полягає у безпосередньому їх зв'язку з процесами, що протікають на підприємстві, оскільки через систему серверів введення – виведення підключаються до різномітної апаратури, що керує і контролює виробничий процес.

Основна роль людино-машинного інтерфейсу – забезпечити взаємодію користувача з пристроями введення / виведення і через них з контрольованим обладнанням. Програмний SCADA-пакет забезпечує взаємодію не лише з пристроями введення / виведення, але і з іншими джерелами інформації типу баз даних (БД), Windows-програм і зовнішніх комп'ютерних систем.

Уся інформація з датчиків, механізмів керування і промислових контролерів в реальному часі поступає в SCADA-системи.

Для забезпечення простоти підключення цих пристроїв використовують сотні серверів введення – виведення, орієнтованих на конкретні типи технологічного обладнання на полях, транспортного цеху, цехів цукрового заводу. Крім того, наявність стандартних інтерфейсів, таких як OPC, DDE, Activex, TCP/IP і інших дозволяє використовувати сервери, розроблені іншими компаніями, що гарантує відкритість рішення. Дані, що надходять в SCADA-систему не лише зберігаються у внутрішній базі даних (БД), але і можуть оброблятися відповідно розробленим алгоритмам, які детально нами розглянуті раніше, що дає можливість реалізувати системи автоматичного керування, тобто робототехнологічні системи керування.

Зрозуміло, що найбільш відповідальні задачі, такі як системи протиаварійного захисту, повинні дублюватися на рівні контролерів, але більшість супервізорних алгоритмів повинно бути реалізовано у системі SCADA. Разом з алгоритмами оброблення інформації у сучасних SCADA-системах є можливість автоматичної генерації сигналів тривоги у відповідності з заданими інженерами або технологами критеріями. Сигнали тривоги, що виникли можуть відображатися на екрані, записуватися у журнал і можуть бути доступними одночасно для декількох робочих місць операторів-диспетчерів.

Підтвердження цих сигналів або квантування виконується одночасно для робочих місць операторів. Під час одержання сигналу тривоги (небезпеки) оператор-диспетчер виконує визначені дії (наприклад, запуск звукового файлу).

Засобами інформування оператора-диспетчера про виникнення яких-небудь аварійних ситуацій і поломок є конфігуруючі небезпеки. Система небезпек може контролювати усі змінні, групи змінних, вирази, результати розрахунків і т.п. Наприклад, (аварійна ситуація з конвеєрною стрічкою (розрив), рівень масла або рідини в резервуарі охолодження дробарок першої



стадії подрібнення, температури, автоматизована система контролю за роботою синхронних двигунів насосів, вентиляторів тощо).

Дуже велике значення має швидке розпізнавання та ідентифікація небезпек, які виникають у процесі виробництва цукру (перенавантаження випарників дифузійного соку, насосів, передозування, рівень технологічних величин тощо).

SCADA - пакет дозволяє вивести інформацію про безпеку у спеціалізовані вікна, однак самі свіжі (корисні) дані повинні бути спостережними в кожному вікні. Тривоги (небезпечні ситуації) можливо групувати по кольору, шрифту і порядку виведення в залежності від пріоритету, категорії і часу виникнення. В SCADA-пакеті є спеціальне сумарне вікно тривоги, куди виводиться уся їх попередня історія.

Реєстрація інформації в основному полягає у зборі і записі визначених аналогових і дискретних параметрів контрольованого технологічного обладнання або процесу.

Програмне забезпечення SCADA-систем не накладає ніяких обмежень на тип реєстрації даних і представляє широкий вибір функцій реєстрації:

- події реєструються в момент виникнення (наприклад, тривоги, етапи процесу, сигнали датчиків і т.п.);
- реєструються всі дії оператора (тип ручного запуску процесу, аварійних зупинок, змін контрольних показників і т.п.);
- реєструються усі помилки і події в середині системи керування (апаратні тривоги, інформація про обмін даних, помилки мережі і т.п.).

Дуже часто призначенням системи автоматизації є збирання і збереження інформації як в якості архіву, так і для подальшого аналізу SCADA-система дозволяє архівувати дані різного типу, без яких-небудь обмежень на тип і місцезнаходження пристрою виведення. З кожною подією може бути зв'язана дія, яка буде виконуватися у момент виникнення цієї події. Наприклад, при завершенні завантаження бункерів буряком про це потрібно повідомити диспетчера заводу і т.п. Контрольовані події можуть мати відношення як до всього підприємства або мати локальне значення з точки зору операторської станції. Якщо SCADA-система використовується у мережі, то подія може оброблятися будь - яким SCADA- комп'ютером (або всіма комп'ютерами). Для того, щоб в інтуїтивній зрозумілій формі оператору було відображено на екрані комп'ютера поточний стан виробничих процесів або мнемосхеми, у SCADA-системі вбудовані спеціальні графічні засоби так названі RAD-графіки.

Графіки будуються на базі дуже простого набору графічних об'єктів, а, отже: прямокутників, еліпсів, точкових зображень, відрізків, ломаних, текстів, символів і труб. У кожного об'єкту є деякий загальний для всіх набір якостей. Усі вони можуть бути безпосередньо пов'язані з параметрами контрольованого обладнання, які будуть визначати поведінку графічних об'єктів.

Переміщення, обертання, зміна розмірів, кольору, заповнення, видимість на екрані і т.п. кожного об'єкту може виконуватися в залежності від реальних виробничих умов, а вимірювання параметрів процесу може бути виконано шляхом зміни параметрів об'єкту.

На дії оператора-диспетчера можуть реагувати усі об'єкти, тому операторський інтерфейс може бути зроблений настільки простим, інтуїтивно зрозумілим і гнучким, настільки це можливо.

В комплекс постачання SCADA-системи входить бібліотека образів, яка містить найбільш часто використані графічні зображення типу насосів, випарників, резервуарів, вентилів, двигунів тощо. Їх використання суттєво розширює можливості використання екранів.

Звіт SCADA-системи – це документ, що відображає деякі виробничі показники, який видається періодично по запиту або при виникненні якої-небудь події, наприклад, при зміні стану якої-небудь змінної, в момент запуску SCADA-системи або у визначений період часу кожного дня.

Звіти можуть генеруватися у форматі корисному для споживача. В нього може входити форматований текст, оперативна і накопичена інформація, а також результати математичних розрахунків. Крім того, звіти можуть вміщати і деякі команди: заміну виробничих параметрів, завантаження технологічних апаратів бункерів, насосних агрегатів, тощо, виконання діагностики (температурних режимів), зміна складу і т.п. Звіти можуть виводитися на екран, роздруковуватися, а також зберігатися на дисках для поетапного друку або перегляду. Звіт можливо обробляти засобами будь-якого текстового редактора. Їх можливо автоматично зберігати у SQL-базах і інших ODBC-сумісних базах даних. Практично у всіх диспетчерських системах визначений набір дій повинен виконуватися лише спеціально підготовленим персоналом. Людино-машинний інтерфейс повинен забезпечувати визначений рівень захисту всупереч випадкового або наміреного виконання операцій, що заборонені. Наприклад, в режимі аварійного зменшення ліміту витрат електроенергії на цукровому заводі відключають: спочатку спеціально виокремлені об'єкти-регулятори. Захист від несанкціонованого доступу інтегрований у всі інтерфейсні елементи SCADA-системи гарантує повну безпеку системи виконання.

Система захисту від несанкціонованого доступу в SCADA-системах реалізована на базі паролльної системи і дозволяє організувати в системі групи користувачів з різними правами під час роботи з системою. Кожному користувачу призначаються свої реєстраційні ім'я і пароль, які він повинен вказувати для одержання доступу до різних компонентів системи. Права користувача визначаються зображенням йому можливості доступу до тих чи інших частин системи. Маючи право доступу до якого-небудь об'єкту технологічної лінії (частини цехів заводу) для виконання тих або інших дій користувач повинен мати відповідний рівень привілей. Кожний графічний об'єкт, вікно, тренд, звіт і т.п. можливо прив'язати до визначеної частини системи і визначити необхідний для їх перегляду або використовувати рівень привілеїв.

Оскільки користувач може працювати на будь-якому комп'ютері мережі, то представлення прав доступу контролюється сервером, а не клієнтом (це ще один додатковий засіб від несанкціонованого доступу до глобальних мереж).

В системах автоматизації та керування виробництвом цукру відмова

обладнання приводить до зменшення виробництва цукру, а інколи (найбільш частіше) до виникнення аварійних ситуацій і аварій.

Усунення відмов в системі без втрат її функціональних можливостей і продуктивності дозволяє реалізація функцій резервування. За допомогою дублювання пристроїв введення / виведення SCADA-системи підтримує конфігурації з повним резервуванням. Визначивши один пристрій як основний, а інші як резервні, SCADA-система у випадку відмови буде автоматично переключатися з одного на інший.

Дякуючи можливості SCADA-системи записувати зміни контрольних параметрів, як у основний, так і резервний пристрій, а також ті пристрої введення / виведення, що проєктувалися без врахування цієї можливості, можуть тепер використовуватися в системах з резервуванням.

Резервування в SCADA-системах тісно пов'язане з системою тривоги. У випадку перебою SCADA-система повідомляє оператора про відмову конкретного пристрою і сповіщає, яке резервне обладнання буде включено в роботу.

На рис.10.3 представлена багаторівнева АСУТП заводу з виробництва цукру з цукрового буряка корпоративного підприємства.

В цій АСУТП використана архітектура клієнт – сервер і резервування виділених серверів. Розглянемо склад і призначення об'єктів АСУТП.

На нижньому рівні АСУТП використані:

1. Контрольно-вимірні прилади необхідні для контролю за виконанням технологічних процесів:

1.1. вирощування буряка (мережа сіток, оцінка якості робіт, цукроватість);

1.2. контроль роботи агрегатів: витрати пального, продуктивність, витрати агентів, якість буряка;

1.3. контроль роботи дільниці №1 транспортування і процесу роботи автосамоскидів;

1.4. контроль роботи пунктів завантаження самоскидів;

1.5. контроль роботи 1-ї стадії збереження буряка та його очищення й мийки буряка

1.6. .контроль (оцінка) стадії подрібнення буряка.

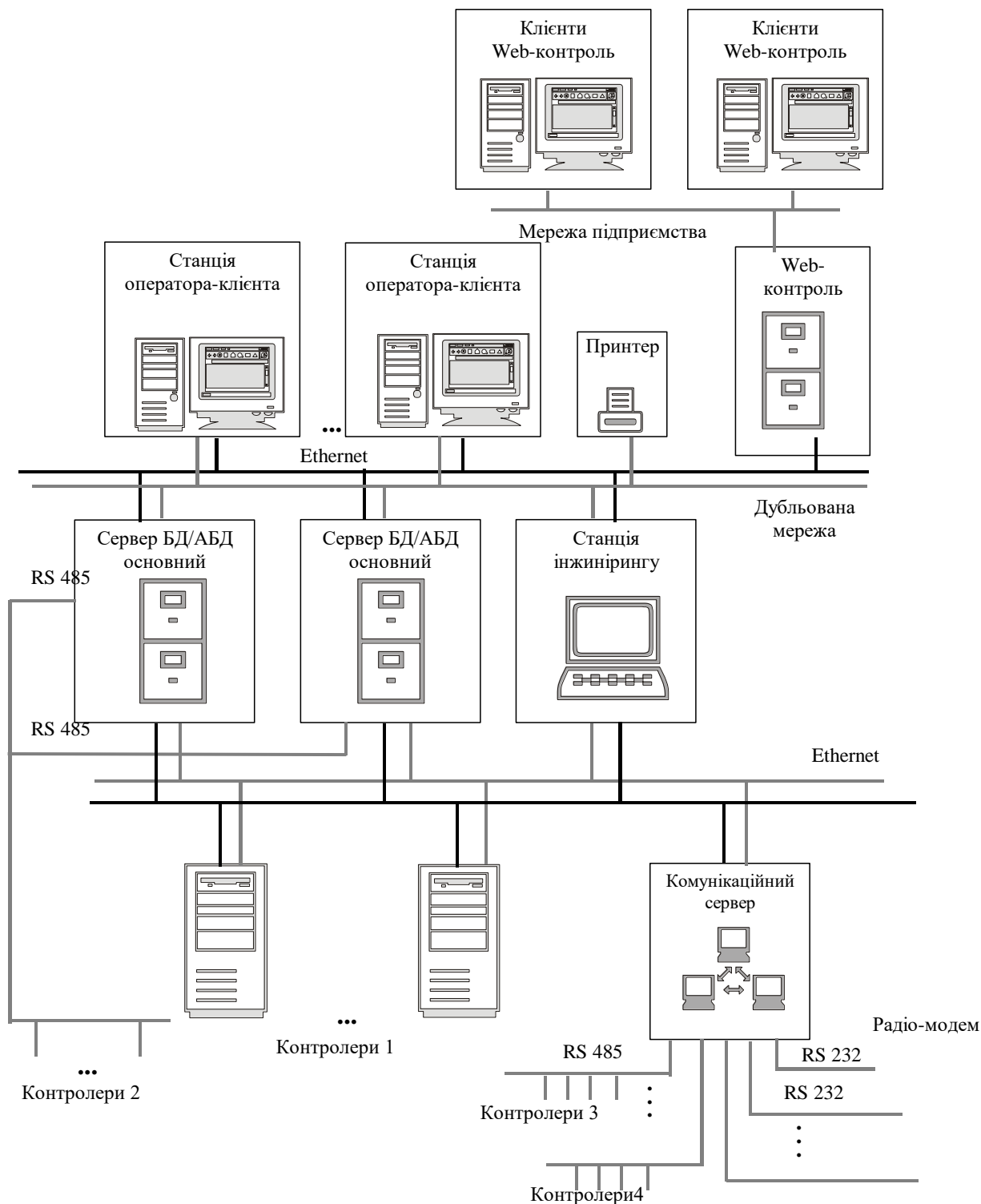
1.7. Контроль параметрів соку- стадія дифузії

1.8. Контроль параметрів стадії очищення соку(дефекосатурації).

1.9. Контроль параметрів стадії випарювання.

1.10. Контроль параметрів стадії кристалізації та одержання білого цукру.

1.11. Контроль параметрів стадії сушки.



**Рисунок 10.3. Багаторівнева АСУТП цукрового заводу з 1,2, ..., N –дільницями**

2. Виконавчі механізми, необхідні для управління технологічним процесом (ТП) на дільниці №1. та стадіях виробництва цукру з цукрового буряка.

3. Перетворювачі сигналів, що забезпечують зв'язок датчиків і виконавчих механізмів з ПК (програмними контролерами).

4. Контролери, що забезпечують введення, обробку і виведення усіх сигналів датчиків і пристроїв системи.

5. Локальна обчислювальна мережа (ЛОМ) 10/100 Мбіт/сек. – 100% “гаряче” резервування.

В системі середнього рівня АСУТП використовуються:

1. Сервери оперативної (архівної) бази даних на базі персональних комп'ютерів або серверів у комплекті з кольоровими графічними моніторами, клавіатурою і промисловими маніпуляторами типу “мишка”.

2. Дубльована локальна обчислювальна мережа (ЛОМ) 10/100 Мбіт/сек. – 100% “гаряче” резервування.

3. Станція інжинірингу на базі персонального комп'ютера в комплекті з кольоровим графічним монітором, клавіатурою і маніпулятором типу “мишка”. Забезпечує мережене завантаження і модифікацію ПО контролерів, а також дозволяє виконувати діагностику контролера і його модулів в режимі on-line.

В системі верхнього рівня АСУТП заводу використані:

1. Станції оператора – диспетчера, станції операторів сільськогосподарських ділянок №1, 2,..., N на базі персональних комп'ютерів у комплекті з кольоровими графічними моніторами, функціональними клавіатурами і маніпуляторами типу “мишка”.

2. Дубльована локальна обчислювальна мережа (ЛОМ) 10/100 Мбіт/сек. – 100% “гаряче” резервування.

3. Принтери підключені через принт-сервер до ЛОМ.

4. Клієнти Web-контроль (начальники ділянок, начальникпереробки сировини, головний механік, головний енергетик, головний інженер по виробництву) забезпечують моніторинг технологічного процесу, використовуючи стандартні програмні засоби Internet / Intranet (Web-браузер).

Сервери оперативної (архівної) бази даних (БД / АБД) використовуються на базі промислових комп'ютерів і функціонують під керуванням операційної системи WindowsNT/2000 Server. Для підвищення надійності роботи серверів і збереження даних на жорстких дисках можливе використання Raid-масивів.

Сервери БД/АБД призначені для збирання, оброблення оперативних даних від ПЗО, збереження і відображення оперативної / архівної інформації по заданим параметрам, її зображення абонентам верхнього рівня (станціям операторів ділянок, диспетчеру тощо) в режимі клієнт-сервер, а також є резервованими і віддзеркалюють свої дані.

До архіву відносяться тренди, друковані документи і протоколи подій. Архівування виконується на жорсткому диску комп'ютера і на змінному носії інформації (наприклад, магнітооптичні диски).

Функції відображення і керування виконуються безпосередньо з серверів БД/АБД, які є додатковими (при необхідності), тому що основними робочими місцями оператора є станції оператора.

На серверах БД/АБД виконуються наступні функції:

1. Індикація на екранах кольорових моніторів загальної мнемосхеми ТП по ділянцям і їх фрагментів з динамічною індифікацією виведених на них параметрів ТП, які відображають стан визначених зон технологічного об'єкту.

Для візуалізації стану технологічного процесу використовують ряд стандартних відеокадрів (загальний вид, детальний вид групи параметрів і т.ін.).

2. Індикація на екрані і звукова сигналізація виходу параметрів за технологічні і аварійні межі, сигналізація аварійних ситуацій.

3. Дистанційне керування виконавчими механізмами і приводами.

4. Дистанційні зміни завдань регуляторам аналогового типу.

5. Резервування і діагностика локальних обчислених мереж зв'язку з УСО (контролерами) і станціями оператора.

6. Корекція часу усіх абонентів системи.

7. Резервування серверів.

8. Зеркалізація даних від основного сервера.

9. Розподіл доступу до засобів системи керування за паролем.

8. Формування змінних, добових рапортів та інших документів.

9. Протоколювання нештатних ситуацій і дій операторів-технологів.

10. Накопичення в журналах наступної інформації:

- повідомлення про порушення та інші дії на об'єкті і в системі керування;

- повідомлення про дії операторів-технологів;

- повідомлення про роботу комплексу технічних засобів контролю і керування.

13. Введення історії параметрів процесу з можливістю наступного перегляду даних на екрані дисплея у вигляді графіків і таблиць, а також їх роздрукування на принтері в табличному вигляді (для серверів АБД).

14. Введення архівів друкованих документів з можливістю наступного перегляду архівних даних на екрані дисплея і роздрукування на принтері, а також автоматичного копіювання архівних даних на магнітооптичних носіїв (для сервера АБД).

Розглянемо більш детально інформаційний обмін з програмно-апаратними засобами нижнього рівня АСУТП. Система збору даних і управління представляє універсальну апаратуру для підтримки необхідних механізмів обміну даними з апаратурою від Siemens, Allen-Bradley, Motorola і ін. При інформаційному обміні враховується специфіка різних промислових мереж (Profibus, Fielbus, Modbus, MPI і т.д.). Дуже широко використовуються стандартні механізми обміну (OPC-OLEforProcessControl) OPC – це стандарт взаємодії між даними і керування, оснований на об'єктній моделі COM/DCOM від фірми Microsoft. OPC є найбільш узагальненим засобом організації взаємодії між різними джерелами і одержувачами даних, такими як пристрої, бази даних і системи візуалізації інформації про контрольований об'єкт автоматизації. Стандарт OLEforProcessControl загальноприйнятий і підтримується всіма провідними фірмами-розробниками SCADA-систем і виробниками обладнання. OPC – взаємодія, основана на клієнт-сервісній схемі, представленої на рис.10.4. OPC забезпечує інтерфейс між програмами-клієнтами і серверами за допомогою стандартного механізму OLE, що реалізує зв'язок між джерелами даних (серверами) і отримувачами даних (клієнтами).

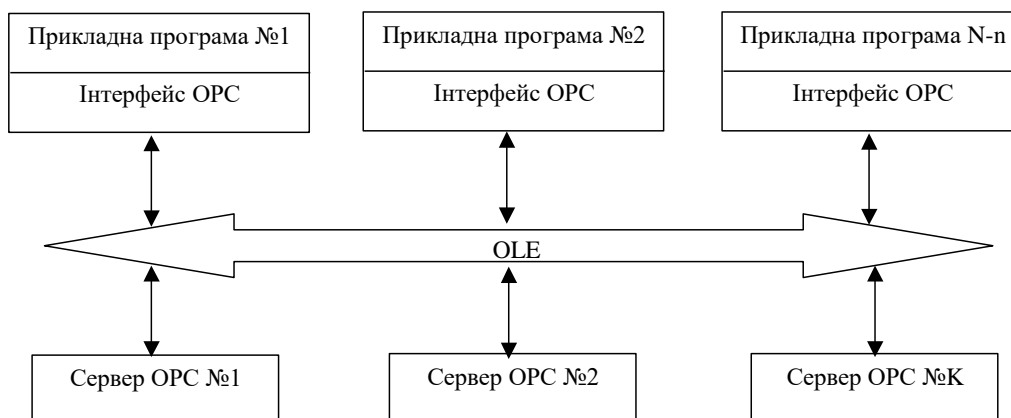
OPC-клієнт (наприклад, SCADA-система), викликаючи певні функції OPC-сервера, підписується на отримання даних процесу з певною частотою.

В свою чергу, OPC-сервер, випробовуючи фізичний пристрій, викликає відомі функції клієнта, повідомляючи його про отримання даних і надаючи ці дані.

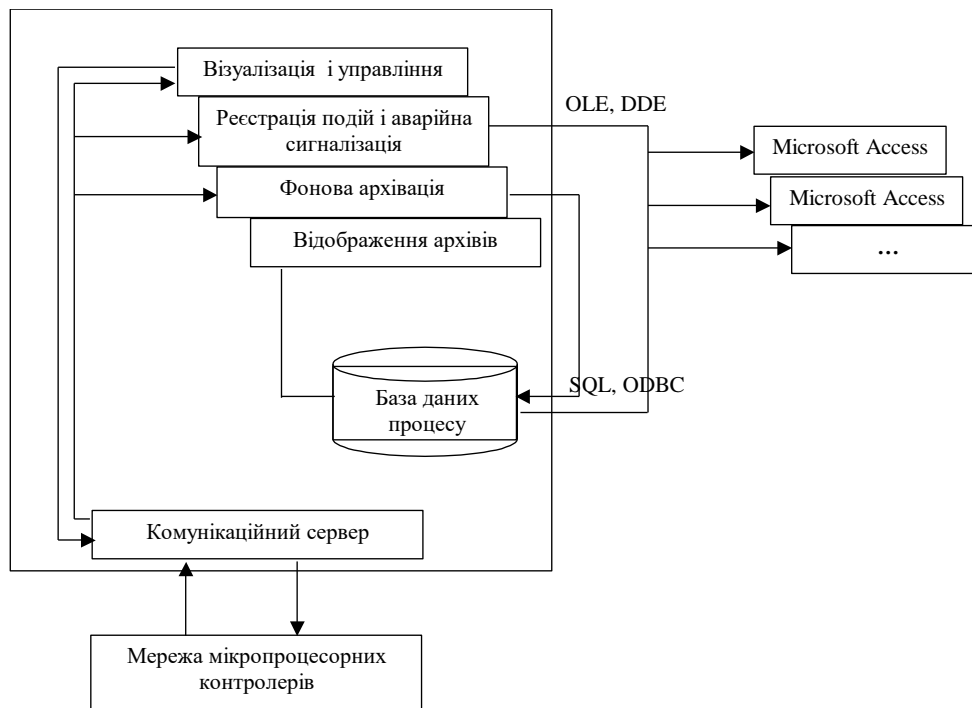
Таким чином, OPC-сервер створює свого роду абстракцію апаратури, дозволяючи OPC-клієнту записувати і зчитувати дані з пристрою. Пристрій вводу-виводу, для якого є OPC-сервер, може використовуватися з будь-якою сучасною SCADA-системою.

Перейдемо до оцінки структури програмного забезпечення верхнього рівня. Система збору даних і оперативного диспетчерського управління є прикладною Windows-програмою (програмним пакетом), розробленою з врахуванням особливостей проектування систем керування дільницями та стадіями виробництва цукру, а також дільниць з виробництва пудри та інших сортів цукру..

Система має модульно-орієнтовану, відкриту архітектуру, представлену на рис.10.5. Функціональні клієнтські компоненти взаємодіють з апаратурною нижнього рівня через комунікаційний сервер, роль якого може відігравати стандартний OPC-драйвер або власної розробки, що підтримує інтерфейс з засобами автоматики (наприклад, кожного механізму, що працюють на підприємстві) на рівні протоколу інформаційного каналу.

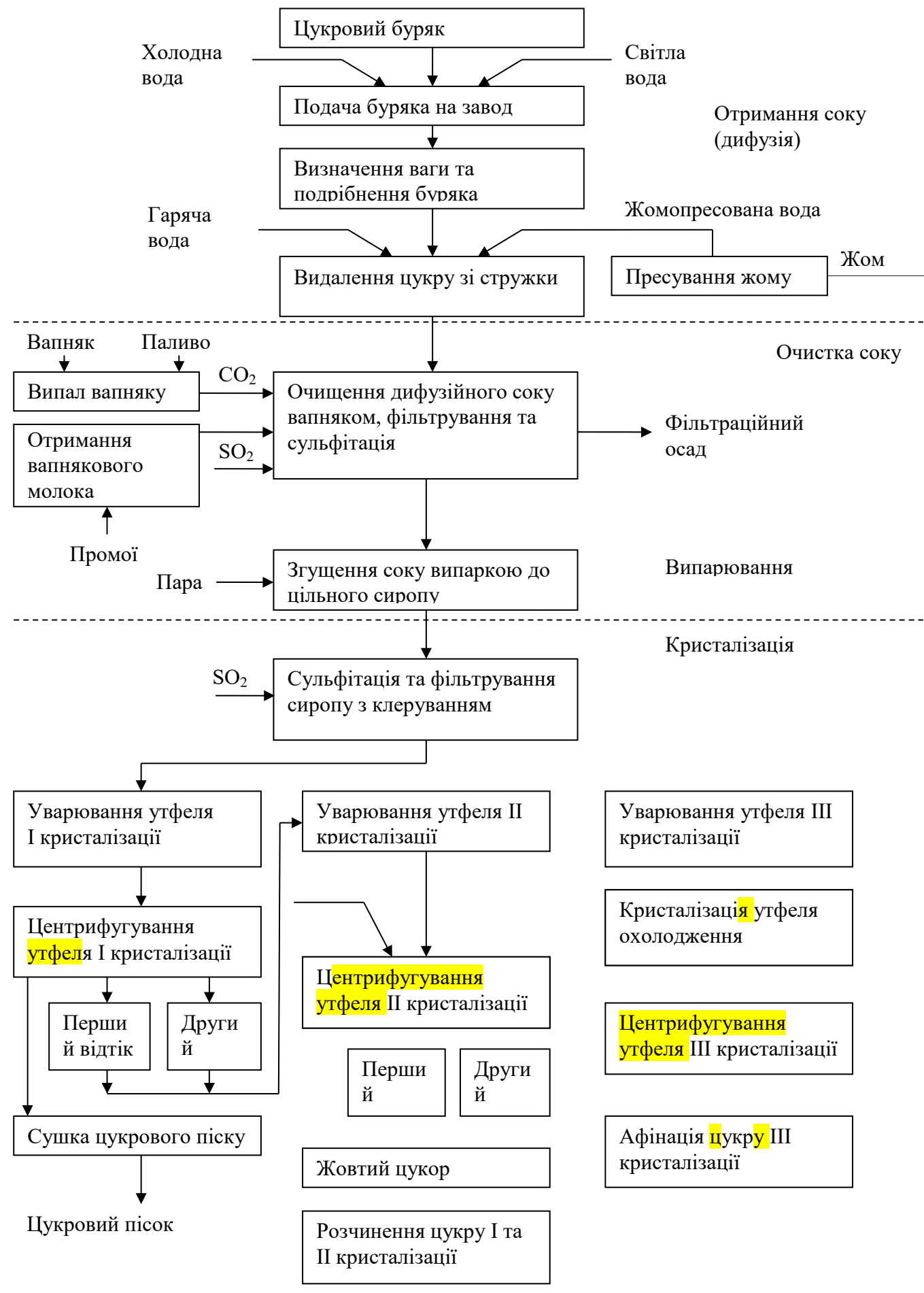


**Рисунок 10.4. – Взаємодія прикладних програм з декількома серверами OPC**



**Рисунок 10.5. Структура збору даних і оперативного диспетчерського керування**





## Рисунок 10.6. – Технологія переробки цукрового буряка

Розглянемо концепцію автоматизації цукрового виробництва на базі сучасної апаратури автоматики.

**1 етап** Спочатку потрібно детально вивчити технологію виробництва цукру. На рис. 10.8 відображено технологічну схему переробки цукрового буряка у цукор-пісок.

Із схеми видно, що типовий трьохступеневий процес виробництва цукру розповсюджений на багатьох цукрових заводах України. Систематизація

**2 етап** Систематизація локальних технологічних процесів, як об'єктів керування. На цьому етапі проєктант чітко визначає завдання керування окремими ТП, а також необхідну для опису процесів кількість інформаційних і керуючих параметрів, збурень та вихідних сигналів.

У процесі вивчення ОК експертна група встановила, що з точки зору автоматизації складних нелінійних процесів виробництва цукру необхідно автоматично підтримувати задані технологічні параметри, а саме: процеси дифузії, очищення, випару соку та кристалізації. Експерти проєкту встановили, що ефективність технологічних процесів виробництва цукрової продукції залежить від оптимальної підтримки теплових режимів роботи обладнання технологічних дільниць цукрового заводу.

Експерти встановили, що чинні системи автоматизації технологічних дільниць не забезпечують необхідної якості продукції, а недостатня точність підтримки технологічних режимів призводить до збільшення витрат енергоносіїв та зниження продуктивності в цілому. На цьому етапі експерти визначають основні вимоги до систем автоматизації відділень цукрового виробництва з метою досягнення:

- 1) максимального виходу продукції;
- 2) досягнення заданого економічного ефекту.

Наприклад, головними вимогами до системи автоматизації відділення дифузії є створення безпечних та ефективних виробничих умов для отримання максимального виходу дифузійного соку відповідної концентрації із стружки, а також забезпечення роботи обладнання дифузійного відділення із заданою нормативною продуктивністю, при одночасному забезпеченні економічності процесу дифузії. Експерти встановили, що при введенні в експлуатацію систем автоматизації дифузійної установки економічний ефект можна досягти за рахунок підвищення продуктивності роботи дифузійної установки, збільшення вмісту цукру у дифузійному соку та за рахунок зниження витрат енергії, пари (газу). За аналогією з цим ТП експерти вивчили всі інші об'єкти керування цукрового заводу. На цьому етапі

**3 етап** На цьому етапі експерти вивчають процес оптимізації виробництва та вибір і обґрунтування критерію оптимальності. У результаті аналізу технічних, економічних і екологічних критеріїв експерти визначають основні чинники, необхідні для їх розрахунків. Таким чином, на цьому етапі проєктних досліджень визначаються основні критеріальні залежності між оптимальними технічними, діагностичними та регульовальними параметрами

процесів дифузії, дефекосатурація, випарювання і кристалізації, які базуються на основі законів збереження тепла та маси, що застосовуються до тепло- і гідротехнічних процесів, які відбуваються при переробці цукрового буряка та сировини на заводі. Отже, на цьому етапі експерти детально вивчають і досліджують:

- технічні (продуктивність, надійність, вихід продукції, якість сировини тощо);
- економічні (прибуток, рентабельність, собівартість, матеріальні витрати на одиницю продукції тощо);
- екологічні (безпечність продукції, мінімізація нанесення шкоди біоті).

Усі критерії пов'язані з узагальнюючим показником – собівартості 1 т цукру.

Таким чином, на третьому етапі експертних досліджень визначено: основні критеріальні залежності між оптимальними діагностичними та регульовальними параметрами процесів дифузії, дефекосатурація, випарювання і кристалізації, що здійснюються при тепло- і гідротехнічних технологічних процесах цукрового виробництва.

**4 етап** На цьому етапі експерти формулюють попередні висновки. Технологічний процес виробництва цукру характеризується наступними основними величинами, а саме: вихід соку і пару ( $G$ , кг/с або м<sup>3</sup>/с); площа перерізу трубопроводів ( $F$ , м<sup>2</sup>); температура ( $\theta$ , °C); теплоємність ( $C$ , м<sup>2</sup>/(с<sup>2</sup>·°C)); коефіцієнт теплопередачі ( $K$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°C) або кг/(с<sup>3</sup>·°C)); час здійснення процесу ( $T$ , с).

Основним сполучним показником та регульованим критерієм, що описує розглянуті технологічні процеси, є тепло, яке можна представити як функцію наведених параметрів:  $Q = (G, F, T, C, R)$  або  $f = (G, F, T, C, R) = 0$ .

З використанням Пі-теорему експерти отримують критеріальне рівняння виду:

$$f\left(\frac{2T \cdot C}{F}\right); \left(\frac{K \cdot 2T}{G}\right) = 0.$$

**5 етап** На п'ятому етапі проектних рішень експертна група виконує синтез адаптивного керування ТП.

При побудові оптимальних регуляторів для розглянутих ТП необхідно провести статистичний аналіз основних збурень та параметрів досліджуваних об'єктів. У цьому випадку необхідно провести ряд пасивних експериментів та отримати масиви даних погодинної роботи всіх основних переробних відділень цукрового виробництва, які будуть використовуватись при побудові лінійних регресійних моделей.

Після аналізу цих моделей експерти оцінюють динамічні параметри ТП, які засновані на використанні рівнянь матеріального балансу і енергетичного або його складової – теплового балансу.

Для цукрового виробництва матеріальний баланс визначається, в основному, по виходу продукції за певний час (годину, добу).

У підсумку визначається коефіцієнт виробництва, який обчислюється співвідношенням виходу цифрової продукції до величини сировини (кількість буряку або цукру в буряку), що подається на переробку.

Енергетичний баланс об'єкта складають на основі закону збереження енергії з урахуванням входу та виходу всіх видів енергії, наприклад, витрат механічної енергії на змішування і стиснення рідини, газів та їх переміщення.

На підставі теплового балансу знаходять витрати води, водяного пару та інших теплоносіїв, а за даними енергетичного балансу – загальні витрати енергії на здійснення процесу переробки сировини. Отримані динамічні моделі можуть бути приведені до моделей у просторі станів, а, отже, в цьому випадку, можуть бути використані багатовимірні оптимальні регулятори.

Наприклад, в цьому випадку проєктанти можуть використати відпрацьований в Україні підхід, заснований на проєктуванні адаптивних регуляторів з ідентифікаторами. В останніх ідентифікація здійснюється у реальному часі, дозволяє оцінити зміну характеристик процесів, що призводить до корекції алгоритму керування та, в кінцевому підсумку, до підвищення якості керування.

**6 етап** На шостому етапі експерти вивчають можливість використання інтелектуальної ідентифікації ТП виробництва цукру на основі нейромережевого підходу.

**7 етап** На сьомому етапі експерти вивчають питання синтезу інтелектуальних систем (схем регуляторів) для автоматизованого керування локальними технологічними процесами цукрового виробництва на основі нейромережевого підходу.

**8 етап** Експерти проводять порівняльні дослідження розроблених інтелектуальних систем на імітаційних моделях.

**9 етап** Експерти розробляють систему інформаційного забезпечення та програмно-алгоритмічне забезпечення автоматизованих робочих місць (АРМ).

**10 етап** Вибір апаратно-програмного ядра, яке може включати інтерфейсну частину, сервер і монітор SCADA і реалізоване, наприклад, на основі спеціалізованого програмного забезпечення типу Контур, Monitor Pro, Citect, Trace Mode.

Автоматизація технологічних процесів виробництва цукру на українських цукрових комбінатах виконана на базі SCADA TRACE MODE.

TRACE MODE – це перша інтегрована інформаційна система для управління промисловим виробництвом, яка об'єднує в цілому продукти класу SOFTLOGIC-SCADA/HMI-MES-EAM-HRM.

SCADA TRACE MODE використана в системі автоматизації технологічних процесів установок дифузії, дефекосатурація та випарювання на багатьох заводах України [3].

У TRACE MODE розроблено диспетчерський рівень САТП дільниці дефекосатурація.

Система забезпечує безперервне одержання даних реального часу і вимірювальних пристроїв (ТСП-Rt 100, ВЛР-230, рН-101 П, БРУ-7) і надання

інформації оператору в зручному та інтуїтивно зрозумілому вигляді [ 3 ].

Сучасна АСУТП представляє собою розподілену систему, яка має різні типи контролерів, зв'язок з якими виконується за допомогою різних польових шин та промислових мереж передачі даних. Кожний АРМ керує своєю дільницею. SCADA-системи, функціями яких є контроль і візуалізація частини (в межах дільниці) технологічного процесу, формування тривоги і аварійної інформації.

Інформація в SCADA-систему надходить від ПЛК, які відповідають за безпосереднє керування технологічним процесом в межах конкретної одиниці автоматизованого обладнання.

Найбільш розповсюдженими в Україні є: GENESIS 32(Iconics), RS View 32, (Rockwell Software), WinCC (Siemens), VipVin (Festo) [6].

проблема зв'язку різних контролерів сьогодні вирішена за допомогою технологій OPC (Ole for Process Control) [3].

Значно поширені системи фірми Siemens, які проєктанти використовують при проєктуванні автоматизації хлібозаводів.

Завдяки застосуванню стандартних механізмів обміну даними OLE, DDE, ODBC, SQL досягається максимальна відкритість і масштабність системи. Одна з унікальних якостей, яка властива даній програмній технології, полягає в тому, що навіть віддалені клієнтські програми можуть отримувати доступ до даних процесу. Модуль візуалізації і керування безпосередньо призначений для відображення технологічних параметрів і оперативного диспетчерського керування на верхньому рівні АСУТП.

Технологічний процес представляється у вигляді динамічних екранних форм (мнемосхем). Для виведення аналогових параметрів можуть застосовуватись різноманітні цифрові, стрілочні і лінійні індикатори. Для індикації стану і режиму роботи технологічного обладнання застосовуються растрові зображення з динамізацією по умові, а також текстові і символні повідомлення.

Для ручного керування технологічним процесом передбачені панелі управління з набором відповідних кнопок, переключачелів режиму та інших елементів.

Існує також можливість перегляду числових значень технологічних границь (уставок) та їх зміни з авторизованим доступом для певних категорій обслуговуючого персоналу.

Перейдемо до реєстрації подій і аварійних ситуацій однієї із дільниць заводу.

Служба реєстрації подій і аварійної сигналізації оповіщає обслуговуючий персонал при виникненні аварійних ситуацій та інших подій, пов'язаних з технологічним процесом і функціонуванням апаратури. При цьому умови, поява яких сприймається системою як аварійна ситуація, можуть бути задані для будь-якого технологічного параметру.

Кожній події ставиться у відповідність текстову строчку (пояснення), яка буде відображатись в журналі повідомлень. Подія сприймається системою як зміна певного дискретного сигналу або їх комбінації. Аварії (тривоги) при

цьому є особливим випадком подій, що потребують оповіщення персоналу і прийняття заходів по усуненню причини і ліквідації наслідків аварії.

Тривога виникає при виході технологічного параметра за допустимі межі. Тривога супроводжується сигналізацією на мнемосхемах за допомогою зміни кольору відображення параметрів і виводу відповідних текстових повідомлень, миготінням кнопок переходу між окремими мнемосхемами. При допустимому значенні параметра тривога знімається і сигналізація зникає.

Після виявлення аварії оператор повинен вжити заходів по її усуненню (шляхом ручного керування технологічним процесом) і заквітувати аварію. Всі дії обслуговуючого персоналу при аварійній ситуації реєструються в архіві.

В процесі управління дільницями заводу система виконує архівацію даних.

Служба архівації призначена для отримання даних від процесів, що виконуються, і підготовки цих даних для відображення і архівування. Архівування здійснюється шляхом запису контрольованих параметрів в базу даних процесу. Дані можуть містити деякі значущі критерії виробничого і технічного характеру стосовно робочого стану системи. Для кожної групи параметрів можна задати різні алгоритми запису інформації в архіві.

Розрізняють наступні методи архівування:

- циклічне послідовне архівування відслідковує значення змінних процесу;
- ациклічне архівування приймає поточне значення тоді, коли відбувається відповідна, попередньо сконфігурована подія.

При циклічному послідовному архівуванні збір даних починається при старті системи і продовжується до тих пір, поки система не буде виключена. Часовий цикл може бути вказаний довільно для будь-якої величини.

При ациклічному архівуванні двійкове або аналогове значення зберігається один раз при появі події. Нижче наведені приклади події запуску і зупинки при ациклічному архівуванні:

- зміна фронту стану дискретного сигналу процесу;
- досягнення граничної величини аналогового значення;
- події, що залежать від часу і дати;
- комбінація клавіш і натиснення миші при використанні системи;
- команди керування від систем верхнього рівня або зовнішньої прикладної програми;
- поєднання наведених вище подій.

Запис миттєвих значень аналогових параметрів здійснюється, як правило, циклічно, тобто через певний проміжок часу. Цей інтервал може бути заданий довільно для кожної групи сигналів. Архівація кожного дискретного сигналу відбувається за умови його зміни. Така схема запису не є типовою і може конфігуруватись, як і цикл архівації, довільно для будь-якого параметру.

Архівна інформація відображається у вигляді графіків і журналів повідомлень з можливістю виводу їх на друк.

Вікно графіків параметрів викликається із архівного меню, в якому задається дата архіву, який необхідно відобразити.

Для кожної групи графіків можна задати діапазон виводу погодинно або цілу добу.

Кількість параметрів, які одночасно переглядаються, - від 1 до 10. Вісь значень градується у відповідних одиницях виміру. Градування по часу - загальне для всіх графіків. Оператор має можливість також визначати точні числові значення параметрів, переміщуючи по графіку лінію - вказівник. Значення параметру, вказане в графі, відповідає точці перетину лінії - вказівника з графіком.

Відображення архівної інформації про аварійні та інші події, що пов'язані з контрольованим технологічним процесом і функціонуванням програмно-апаратних засобів, здійснюється за допомогою журналу повідомлень.

Для більш зручної форми сприйняття повідомлення в залежності від їх типу (аварійна, попереджувальна сигналізація, зміна режиму роботи обладнання, системні повідомлення) відображаються заданими кольорами фону і тексту.

Комунікаційний сервер є засобом для підключення апаратури нижнього рівня до прикладних програм Windows. Кожний вид комунікаційного сервера реалізує інтерфейс з певним типом обладнання, наприклад програмованими контролерами або іншим популярним класом апаратури. Обмін даними між комунікаційним сервером і компонентами системи здійснюється за допомогою швидкісного програмного інтерфейсу.

Комунікаційний сервер в залежності від специфіки проєкту може бути стандартним (при використанні засобів OPC) або власної розробки. При цьому він виконує наступні функції:

- підтримує двосторонній інформаційний зв'язок із засобами автоматизації нижнього рівня на рівні протоколу інформаційного каналу;
- сприймає запити і команди оператора і передає їх в адрес контролерів і виконавчих механізмів;
- здійснює керування чергою вихідних запитів і команд;
- приймає дані від систем автоматизації нижнього рівня, здійснює перевірку достовірності отриманих даних;
- при отриманні достовірних вхідних даних оповіщає вказані компоненти системи про прийом даних;
- передає отримані дані до систем відображення, керування, архівації з можливістю вибору способу передачі (циклічне, по запиту, при зміні даних процесу, по мірі надходження даних).

Завдяки відкритості розробленої системи, що передбачає можливість обміну даними із зовнішніми прикладними програмами, забезпечується її інтеграція з програмними компонентами інших розробників, офісними пакетами, засобами віддаленого доступу, телекомунікаційними засобами зв'язку.

### 10.5 Автоматизація типових об'єктів харчових виробництв[3,5]

Технологічні процеси харчових виробництв відповідно до їх загальних фізико-хімічних та біологічних закономірностей можна подати у вигляді таких типових процесів: механічні, гідромеханічні, теплові, масообміни, хімічні та мікробіологічні. Така кваліфікаційна ознака покладена в основу розробки типових схем автоматизації. Більшість харчових виробництв складається із декількох різних типових процесів. Це дозволяє розглядати кожен такий процес як об'єкт локальної автоматизації, для якого розробляються типові локальні системи автоматичного вимірювання, контролю, регулювання та управління. Під час розробки локальних схем автоматизації слід також урахувувати й особливості конструкції технологічного обладнання, що застосовується для здійснення цього процесу. Різні конструкції апаратів значною мірою впливають на статичні та динамічні характеристики об'єкта, що може привести до різних рішень щодо його автоматизації. До найбільш поширених типових схем автоматизації належать схеми контролю й регулювання температури, тиску, рівня та витрати.[5]

*Система автоматичного контролю та регулювання температури.* У харчових виробництвах широко застосовуються теплові процеси. Теплові об'єкти характеризуються інерційністю та запізненням, що зумовлює значну тривалість перехідних процесів. Завдання регулювання температури в апаратах полягає в регулюванні теплового потоку від теплоносія крізь стінку до речовини, що нагрівається. Найбільш поширений спосіб регулювання – це стабілізація температури в апараті шляхом зміни витрати теплоносія.[5]

Схему автоматизації температури продукту показано на рис. 10.5. АСР складається з датчика 1-1, показувального та регулювального приладу 1-2, виконавчого механізму 1-4 і регулювального органу 1-5, що змінює подачу пари в теплообмінник. Для можливості ручного управління в АСР передбачено панель дистанційного управління 1-3.

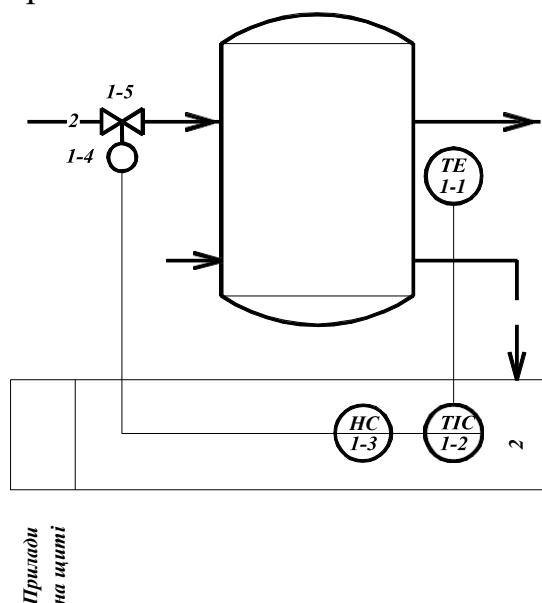


Рисунок 10. 5. – *Схема автоматизації регулювання температури*[5].



Система автоматичного контролю та регулювання тиску. У харчових виробництвах часто виникає необхідність регулювання тиску газу, пари та рідини в трубопроводах. При цьому застосовують регулятори прямої дії (рис. 10.6, а). Схему автоматизації місцевого контролю тиску наведено на рис. 10.6,б.

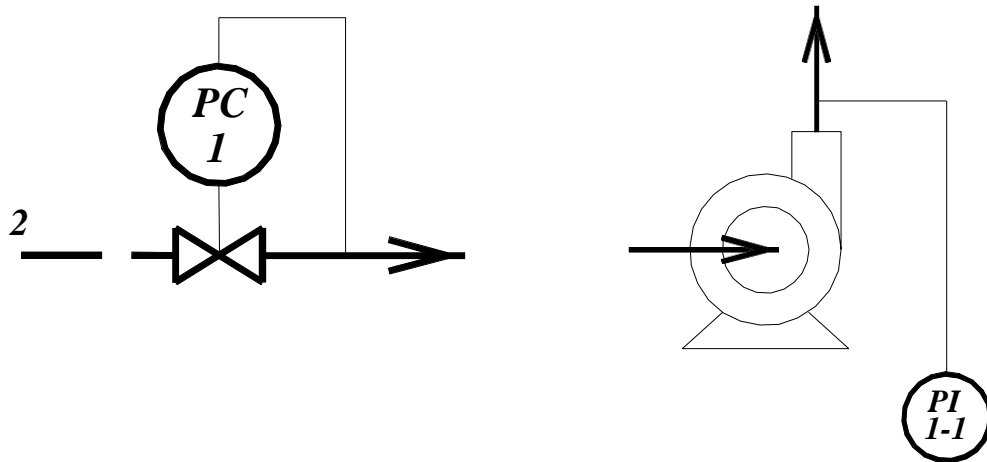


Рисунок 10.6. – Схеми автоматизації контролю та регулювання тиску;  
а – регулятор тиску прямої дії; б – контроль тиску

Системи автоматичного контролю та регулювання рівня. Системи автоматичного регулювання рівня призначаються для дозування рідини, забезпечення заданої її витрати, стабілізація рівня в ємності. Для забезпечення заданої витрати рідини використовують накопичувальні ємності. Схемою автоматизації (рис. 10.7) передбачено двопозиційне регулювання рівня в такій ємності. Датчики рівня 1-1 (верхнього) та 1-2 (нижнього) подають сигнали на позиційний регулювальний пристрій 1-3, який діє на електромагнітний клапан 1-4, що регулює подачу продукту у ємність. Із досягненням заданого рівня вмикаються сигнальні лампи HL1 або HL2.

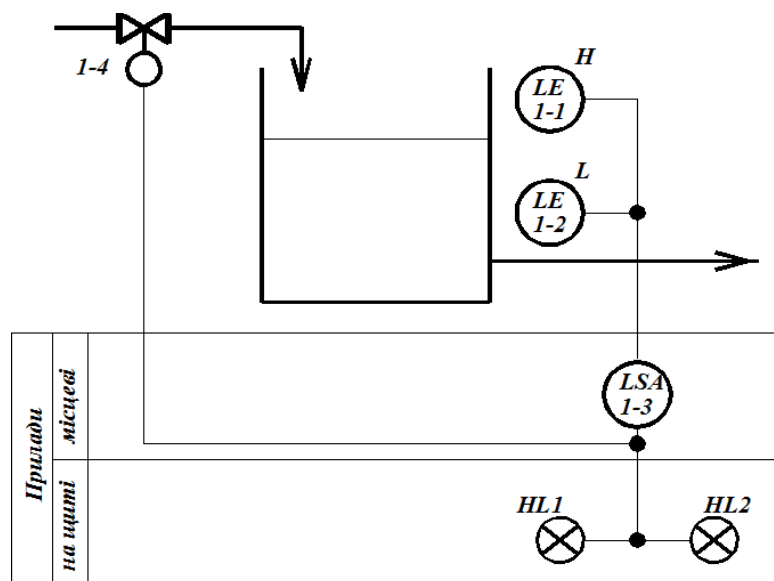
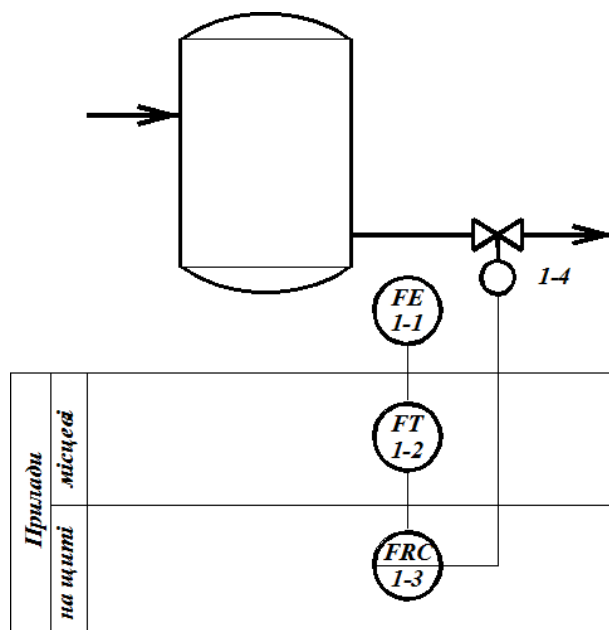


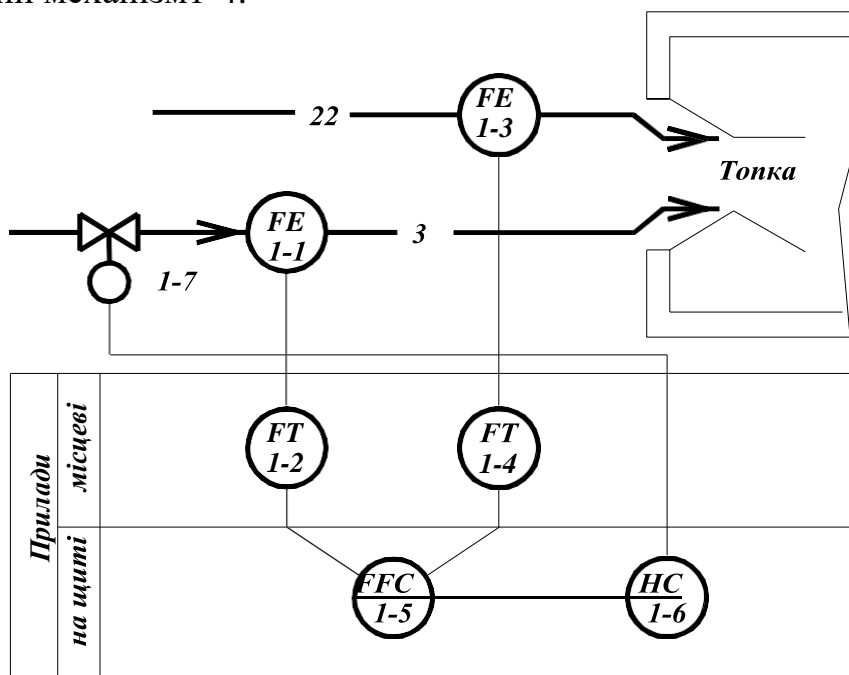
Рисунок 10.7. – Схеми автоматизації двопозиційного регулювання рівня[5].

Системи автоматичного контролю та регулювання витрати. Системи автоматичного регулювання витрати газу, пари, рідини та сипких матеріалів призначені для стабілізації заданої постійної за часом масової або об'ємної витрати, підтримання заданого співвідношення витрати кількох рідин або газів.[5]



**Рисунок 10.8.** – Схема автоматизації регулювання витрати рідини[5].

В АСР стабілізації витрати продукту (рис. 10.8) сигнал від датчика 1-1, що встановлюється на трубопроводі, крізь проміжний перетворювач 1-2, подається на показувальний реєструвальний та регулювальний прилад 1-3, що діє на виконавчий механізм 1-4.



**Рисунок 10.9** – Схема автоматизації регулювання співвідношення витрат[5].

Для підтримання заданого складу суміші кількох газів або рідин застосовується схема регулювання співвідношення витрати одного компонента до іншого в заданій пропорції (рис. 10.9). Витрати компонентів вимірюються витратомірами 1-1 та 1-3. Сигнали від датчиків подаються на проміжні перетворювачі 1-2 та 1-4 і далі на регулятор співвідношення 1-5. Крізь панель дистанційного управління 1-6 регулятор діє на виконавчий механізм 1-7, що змінює витрату веденого компонента залежно від витрати ведучого компонента.

### **Контрольні запитання:**

1. Поясніть суть технічного проекту дискретних систем автоматизації виробництва продуктів харчування. Документація проекту.
2. В чому особливість аналізу схем автоматизації технологічних процесів.
3. Поясніть, які умовні зображення приладів для вимірювання, реєстрації та автоматичного регулювання параметрів. використовують проектанти.
4. Які літерні позначення вимірювальних величин і функцій виконуються при проектуванні.
5. Наведіть алгоритм проектування систем автоматизованого керування дискретними процесами виробництва цукру.
6. Поясніть суть концепції SCADA- систем при проектуванні АСУ ТП цукрових заводів.
7. Особливості автоматизації типових об'єктів харчових виробництв:
  - 7.1. Систем автоматичного контролю та регулювання витрати газу
  - 7.2. Автоматизації двопозиційного регулювання рівня рідини в технологічних апаратах.

## Тема 11.Робастні системи автоматичного керування

### 11.1. Принципи побудови робастних систем автоматичного керування

У процесі управління багатомірними динамічними об'єктами виробництва продуктів здорового харчування часто зустрічаються задачі, коли ціль управління може бути зведена до деякого обмеження на вектор стану об'єкту.

Будемо вважати, що об'єкти керування виробництва продуктів харчування, що розглядаються у арифметичному просторі  $R^n$  є динамічними і в загальному випадку можуть бути як лінійними, так і нелінійними, а також як стаціонарними, так і нестаціонарними.

В загальному випадку будемо вважати, що рівняння стану об'єкту управління представляє собою звичайне диференціальне рівняння, яке приводять до нормальної форми або до форми Коші [2,9,65] і має вид:

$$\begin{cases} \dot{X} = f^\alpha(x, u, w, \beta, t) \\ X(t) = x_0, t \geq 0, \end{cases} \quad (11.1)$$

де  $x-(n \times 1)$  – вектор стану об'єкту;

$u-(m \times 1)$  – вектор керування;

$w-(r \times 1)$  – вектор збурень;

$\beta -(d \times 1)$  – вектор параметрів об'єкту;

$\alpha-(n \times 1)$  – вектор індексів, компоненти якого можуть приймати випадкові дійсні значення із  $R'$ ;

$f^\alpha(\cdot)$ - деяка  $(n \times 1)$  – вектор-функція, що забезпечує існування і єдиність рішення задачі Коші [9,65] із зоною визначення  $D_{f^\alpha} \subseteq R^{n+m+r+d+1}$ .

Розглянемо методи побудови робастних систем автоматичного керування (САК).

На рис.11.1 представлена структура САК, в якій корегуючий пристрій (КП) є лінійною безінерційною ланкою.

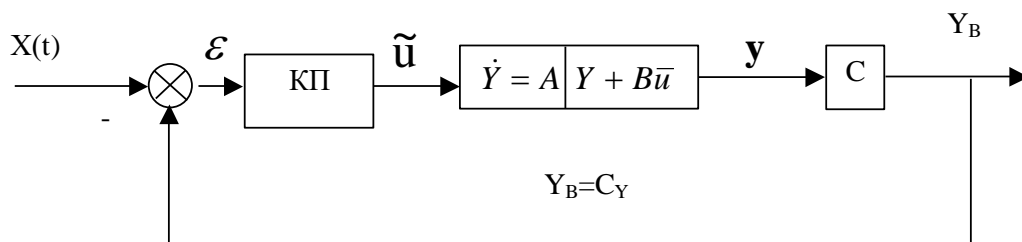


Рис.11.1. Система автоматичного керування в прямому ланцюгу

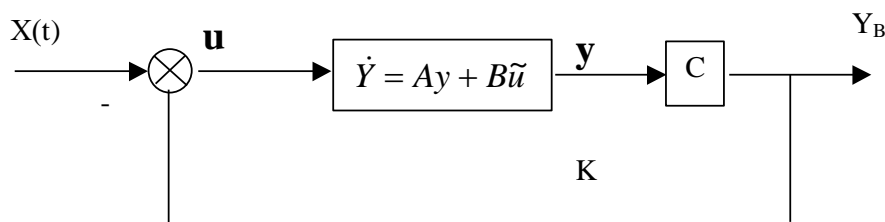


Рисунок 11.2 – Система автоматичного керування в ланцюгу зі зворотнім зв'язком

В САК представлених на рис.11.1, рис.11.2 використані наступні

позначення:

$V$  – вектор виходу;

$Y_B = C_Y$  рівняння вимірника;

$\bar{\varepsilon} = x - y$  - вектор відхилу;

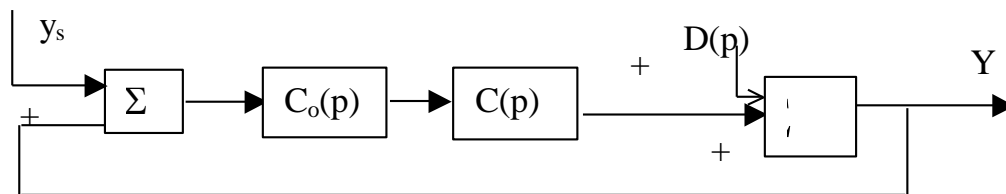
$x(t)$  – вектор задавальних впливів;

$k$ -( $m \times 1$ ) – матриця регулятора (зворотнього зв'язку, яка в загальному випадку може бути нестационарною, тобто  $k=k(t)$ , а  $U=KY_B=KC_Y V$  - рівняння регулятора).

На рис.11.3 представлена САК технологічного процесу копчення риби, в якій;  $G(p)$  - передавальна функція технологічної системи;  $G(p)$  – передавальна функція регулятора;  $u$  – управлінська змінна;  $y_s$  – вставка. В цій системі зв'язок між керованою і управлінською змінною наступний:

$$Y(p) = G(p)U(p),$$

а завданням регулювання є підтримання умови  $y(t)=y_s(t)$  для кожних із збурень  $D(t)$ .



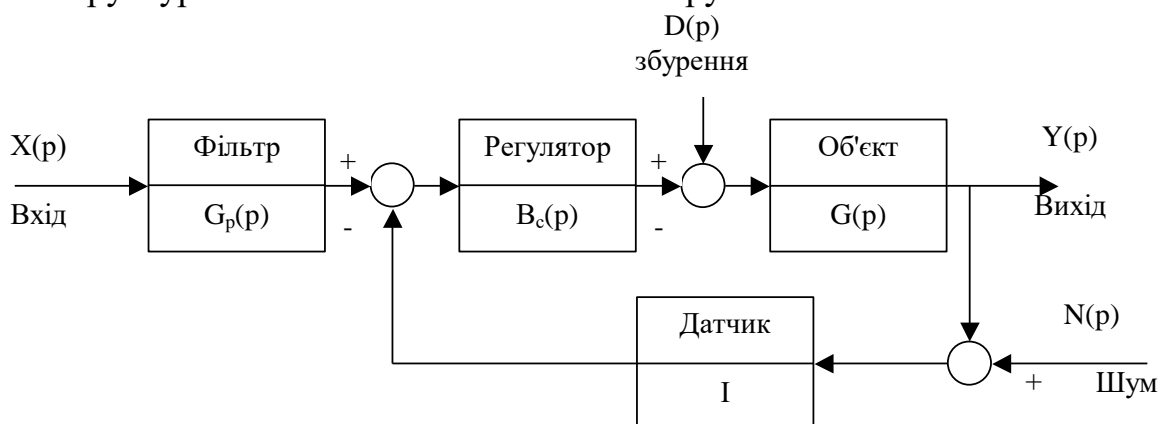
**Рисунок 11.3. – Система автоматичного керування технологічним процесом зі зворотнім зв'язком**

Система на рис.11.3 відрізняється від систем автоматичного керування на рис.11.1, 11.2 тим, що передатні функції регулятора технологічного процесу записані у вигляді операційної моделі з оператором  $p=d/dt$ .

Перейдемо до більш детального проектування локальних систем керування технологічними процесами виробництва продуктів здорового харчування, але спочатку розглянемо методи проектування робастних САК.

Систему, що характеризується допустимими змінними якості при зміні або неточності її моделі, називають робастною.

Робастна система керування має потрібні якості, незважаючи на суттєву невизначеність характеристик об'єкту управління. На рис.11.4 представлена типова структурна схема замкненої системи керування.



#### Рисунок 11.4. – Типова структурна схема замкненої системи керування

На цій структурній схемі показані елементи робастної системи керування: сигнал входу  $X(p)$  якого поступає на фільтр  $G_p(p)$  і далі через суматор на регулятор  $G_c(p)$ , який керує об'єктом  $G(p)$  з виходом  $Y(p)$ . Дана модель враховує шум датчика  $N(p)$ , непередбачені збурення  $D(p)$  і об'єкт керування  $G(p)$  з неврахованою динамікою або параметрами, які схильні до змін.

Основне завдання системи при значних змінах цих параметрів – зберегти бажану якість в умовах невизначеності. Синтез систем високої точності в умовах невизначеності є класичною проблемою теорії керування [3,9]. Система є робастною, якщо вона володіє достатньою надійністю, грубістю і гнучкістю.

Робастність, по суті справи, характеризується чутливістю системи до факторів, які не враховуються на етапах аналізу і синтезу.

Наприклад, у випадку якщо не враховувати шум датчика і систему параметрів, які впливають на її динаміку, то система повинна бути спроможна протидіяти впливу цих факторів при виконанні задач, заради яких вона спроектована.

При малих змінах параметрів в якості міри робастності можливо використати диференціальну чутливість і чутливість кореня. Чутливість системи визначається так:

$$S_{\alpha}^w = \frac{\partial W(p) / W(p)}{\partial \alpha / \alpha}, \quad (11.2)$$

де  $\alpha$  – параметр, а  $W(p)$  – передатна функція системи.

Чутливість кореня визначається так:

$$S_{\alpha}^{r1} = \frac{\partial r_i}{\partial \alpha / \alpha}. \quad (11.3)$$

Проведемо аналіз робастності системи, наведеної на рис.11.4. Потрібно, щоб помилка відтворення вхідного сигналу  $x(t)$ ,  $e(t)=x(t)-y(t)$  була достатньо малою, а збурення  $\alpha(t)$  повинно по можливості незначно впливати на вихідну зміну  $y(t)$ . Шум датчика  $n(t)$  повинен бути малим в порівнянні з  $x(t)$ , тобто  $|x| \rightarrow |n|$ .

Функція чутливості дорівнює:

$$S(p) = [1 + G_c(p)G(p)]^{-1}, \quad (11.4)$$

а передавальна функція замкненої системи при  $G_p(p)=1$  має вид:

$$W(p) = \frac{G_c(p)G(p)}{1 + G_c(p)G(p)}. \quad (11.5)$$

Таким чином,

$$S(p) + W(p) = 1. \quad (11.6)$$

Функцію  $S(p)$  бажано мати малою. У реалізованих фізичних системах коефіцієнт підсилення контуру  $L(p)=G_cG(p)$  на високих частотах повинен бути малим. Це значить, що на вищих частотах  $S(j\omega) \rightarrow 1$ .

Адаптивне відхилення характеризує набір можливих передавальних

функцій об'єкту керування (тут ми припускаємо, що  $G_c(p)=1$ ).

$$G_\alpha(p) = G(p) + A(p), \quad (11.7)$$

де  $G(p)$  є номінальна передавальна функція, а  $A(p)$  – його змінна частина, що обмежена по модулю.

Припускаємо, що  $G_\alpha(p)$  і  $G(p)$  мають однакове число полюсів у правій половині  $S$ - площини (якщо такі існують). Тоді стійкість системи не зміниться, якщо

$$|A(j\omega)| < |1 + G(j\omega)| \text{ для усіх } \omega.$$

Ця умова гарантує лише стійкість, але не відноситься до динамічних показників якості.

При мультиплікативному відхиленні передавальна функція об'єкту керування приймає вигляд:

$$G_m(p) = G(p)[1 + M(p)]. \quad (11.8)$$

Змінна  $M(p)$  також вважається обмеженою по модулю, і як і раніше будемо вважати, що  $G_m(p)$  і  $G(p)$  мають однакове число полюсів у правій площині. Тоді стійкість системи не зміниться, якщо

$$|M(j\omega)| < \left| 1 + \frac{1}{G(j\omega)} \right| \text{ для усіх } \omega. \quad (11.9)$$

Вираз (11.9) називається робастним критерієм стійкості. Він слугує перевіркою робастності по відношенню до мультиплікативного відхилення. Такий вид відхилень використовується дуже часто, тому що:

- він є малим при низьких частотах, коли номінальна модель об'єкту звичайно гарно відома;
- він є великим на високих частотах, коли номінальна модель об'єкту завжди неточна.

Для системи представленої на рис.11.4

$$G_p(p)=1, G_c(p) =K, G(p) = \frac{170000(p + 0.1)}{p(p + 3)(p^2 + 10p + 10000)}. \quad (11.10)$$

При  $k = 1$  ця система нестійка, але її можливо зробити стійкою, зменшивши коефіцієнт  $k$  до значення  $k = 0,5$ . Тепер оцінимо вплив не врахованого у моделях полюса, якому відповідає  $\omega = 50$ рад/с. В цьому випадку мультиплікативне відхилення має вид:

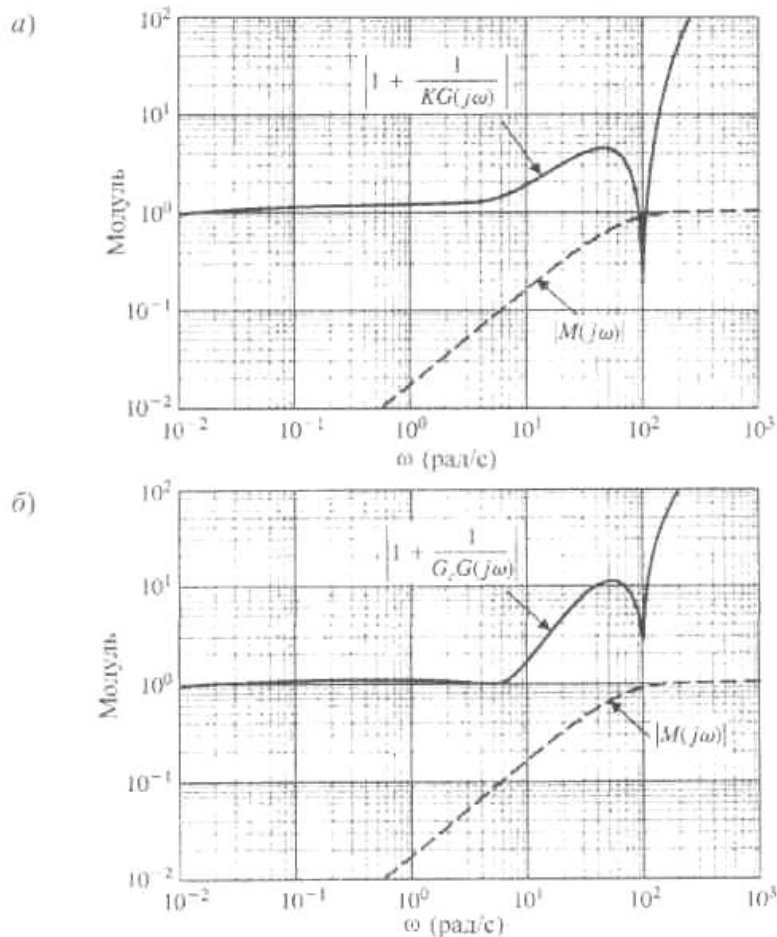
$$1 + M(p) = \frac{50}{p + 50},$$

або  $M(p) = -p/(p + 50)$ . Для модуля  $M(j\omega)$  маємо:

$$|M(j\omega)| = \left| \frac{-j\omega}{j\omega + 50} \right|.$$

Графіки  $|M(j\omega)|$  і  $1 + \frac{1}{|KG(j\omega)|}$  наведені на рис. 11.5. При цьому нерівність

для робастного критерію стійкості задовольняється і система стає стійкою.



**Рисунок 11.5. Критерії робастної стійкості**

При синтезі системи зі структурою представленою на рис.11.4 є дві ступені свободи, пов'язаних з вибором первісного фільтра  $G_p(p)$  і регулятора  $G_c(p)$ , які задовольняють вимоги до перехідного і встановленого режимів, а також до частотних характеристик системи. При цьому смуга пропуску регулятора повинна бути достатньо малою.

Ця умова пов'язана з наступним: при зміні вхідного сигналу системи завжди виникає шум, а у випадку великого рівня шуму може виникнути ефект насичення останніх каскадів регулятора або вхідних засобів об'єктів регулювання. Перейдемо тепер до оцінки системи з невизначеними параметрами. Багато систем мають ряд параметрів, які є постійними, але їх значення знаходяться у деякому діапазоні.

Наприклад, розглянемо систему з характеристичними рівнянням виду

$$p^n + a_{n-1}p^{n-1} + a_{n-2}p^{n-2} + \dots + a_n = 0. \quad (11.12)$$

Відомо лише, що коефіцієнти цього рівняння знаходяться в інтервалах:

$$a_i \leq a_i \leq \beta_i, \quad i=0, \dots, n,$$

де  $a_n=1$ .

Для дослідження системи необхідно перебрати усі можливі поєднання параметрів. У той же час цю задачу ми можемо звести до дослідження обмеженого числа поліномів найгіршого виду.

Наприклад, для системи третього порядку, що має характеристичне



рівняння виду:

$$p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0, \quad (11.13)$$

достатньо дослідити чотири поліноми:

$$q_1(p) = p^3 + a_2 p^2 + \beta_1 p + \beta_0$$

$$q_2(p) = p^3 + \beta_2 p^2 + a_1 p + a_0$$

$$q_3(p) = p^3 + \beta_2 p^2 + \beta_1 p + a_0$$

$$q_4(p) = p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + \beta_0$$

Один із цих чотирьох поліномів буде представляти найгірший випадок і може вказувати на те, що система або нестійка, або у крайньому випадку, має найгіршу якість.

Розглянемо систему третього порядку з невизначеними коефіцієнтами, де

$$8 \leq a_0 \leq 60 \rightarrow a_0 = 8, \beta_0 = 60$$

$$12 \leq a_1 \leq 100 \rightarrow a_1 = 12, \beta_1 = 100 \quad (11.14)$$

$$7 \leq a_2 \leq 25 \rightarrow a_2 = 7, \beta_2 = 25$$

утворимо наступні чотири поліноми:

$$q_1(p) = p^3 + 7p^2 + 100p + 60,$$

$$q_2(p) = p^3 + 25p^2 + 12p + 8, \quad (11.15)$$

$$q_3(p) = p^3 + 25p^2 + 100p + 8,$$

$$q_4(p) = p^3 + 7p^2 + 12p + 60.$$

Дослідивши ці чотири поліноми за допомогою критерію Рауса - Гурвіца, ми можемо збагнути, що система стійка у всьому діапазоні невизначених параметрів процесу виробництва продуктів харчування [2,9].

## ***11.2. Синтез робастних систем керування***

Синтез робастних систем включає дві задачі: визначення структури регулятора і налагодження його параметрів з метою одержання "оптимальної" якості системи. Процедура синтезу звичайно розпочинається з уяви про наявність "повної інформації про об'єкт".

Крім цього, об'єкт керування представлений у вигляді лінійної неперервної моделі з постійними параметрами.

Структуру регулятора вибирають так, щоб реакція системи задовольняла визначеним критеріям якості.

При поставленні задачі синтезу одним із можливих вимог може полягати в тому, щоб вихідні змінні системи одночасно і точно ідентифікували усі зміни вхідного сигналу. Це означає, що передавальна функція системи повинна бути рівна одиниці:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = 1. \quad (11.16)$$

Іншими словами, частотно-амплітудна характеристика такої системи на всьому діапазоні частот повинна мати 0 дБ (це відповідає нескінченій смузі

пропускання), а фазова характеристика на усіх частотах повинна дорівнювати нулю. На практиці таке неможливо, оскільки будь-яка практична система має елементи ємності, індуктивності, накопичувальні елементи енергії того чи іншого типу. Ці елементи в купі з елементами, що розсіюють енергію, визначають динаміку системи керування.

Такі системи, деякі входні сигнали можуть ідентифікувати достатньо точно, в той же час як інші не можуть їх ідентифікувати – і все це тому, що смуга пропускання реальної системи не є нескінченною.

Для умови виробництва продуктів харчування з широкого спектру сировини із різними характеристиками один із варіантів постановки задачі може включати вимоги мінімізації впливу збурень на вихідну змінну системи [1,5,13].

Тут нам потрібно мінімізувати  $Y(p)/D(p)$  у як найменшому інтервалі частот.

Розглянемо систему, представлену на рис.11.6. В цій системі  $G_1(p)$  - передавальна функція об'єкту керування, а  $D(p)$  – збурення. Тоді ми маємо:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{G_c G_1 G_2(p)}{1 + G_c G_1 G_2(p)}, \quad (11.17)$$

$$i \frac{Y(p)}{D(p)} = \frac{G_2(p)}{1 + G_c G_1 G_2(p)}. \quad (11.18)$$

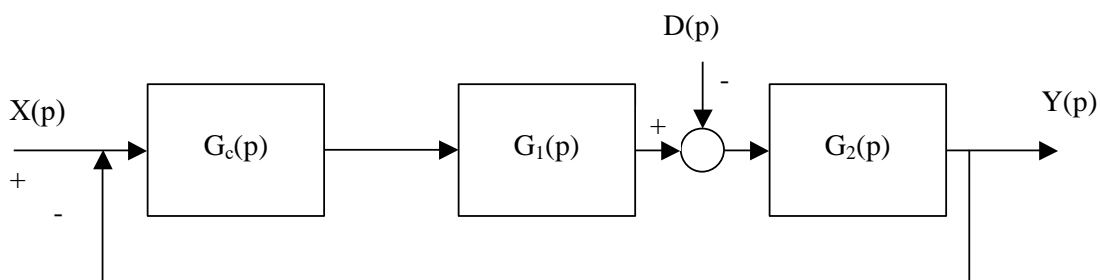


Рисунок 11.6. Система керування за наявності збурення

Відмітимо, що передавальна функція як по відношенню до еталонного входного сигналу, так і по відношенню до збурення має один і той же знаменник, тобто система має одне характеристичне рівняння:

$$1 + G_c(p)G_1(p)G_2(p) = 1 + L(p) = 0. \quad (11.19)$$

Нагадуємо, що чутливість  $T(p)$  до зміни  $G(p)$  дорівнює:

$$S_G^T = \frac{1}{1 + G_c G_1 G_2(p)}, \quad (11.20)$$

тобто характеристичний поліном вносить суттєвий вплив на чутливість системи. Вираз (11.20) показує, що для одержання малої чутливості  $S$  необхідно мати велике підсилення у контурі  $L(j\omega)$ , але, як відомо, це може привести до нестійкості системи, або до суттєвого погіршення її якості.

Тому проєктант повинен досягти наступного:

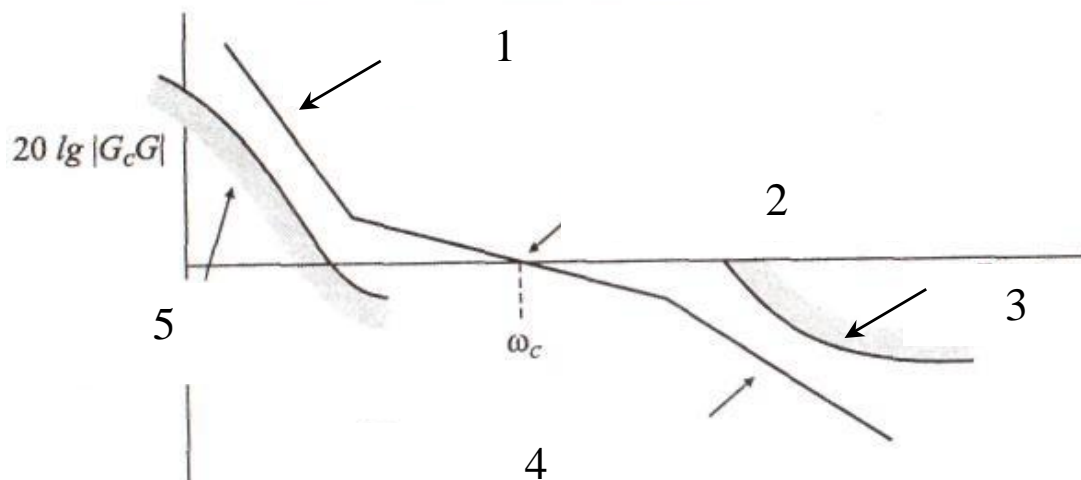
1.  $W(p)$  з широкою смугою пропускання і правильним відтворення  $X(p)$ .

2. Контур  $L(p)$  з великим запізненням, щоб мінімізувати чутливість  $S$ .

3. Велике підсилення у контурі  $L(p)$ , головним чином, за рахунок  $G_c(p)G_1(p)$  оскільки  $\frac{Y(p)}{d(p)} \approx \frac{1}{G_c G_1(s)}$ .

Задача синтезу робастної системи у частотній області пов'язана з визначенням такого регулятора  $G_c(p)$ , при якому чутливість замкненої системи була б менше деякого допустимого значення, а мінімізація чутливості потребує вибору такого регулятора, щоб ця чутливість була рівною або достатньо близькою до мінімального значення.

Аналогічно задача забезпечення заданого запасу стійкості по модулю пов'язана з надходженням відповідного регулятора, а максимізація запасу по модулю все ж таки потребує вибору такого регулятора, при якому цей запас був би найбільш близьким до максимального.



**Рисунок 11.7. Частотно-фазова характеристика для  $20 \lg |G_c G(j\omega)|$**

На рис.11.7 позначено:

1 Високе підсилення для визначення точності відтворення вхідного сигналу.

2 Частота і асимптота, що визначають закони по модулю і по фазі.

3 Межа робастності.

4 Незначне підсилення для зменшення чутливості до шуму датчика і невизначеності моделі.

5 Нижня межа, що визначає вимоги до якості.

На рис.11.7 представлений підхід до синтезу робастної системи за допомогою амплітудно-частотного методу дослідження для  $G_c G(j\omega)$ . За допомогою цього методу можливо сформулювати наступні вимоги, яким повинні задовольняти частотні характеристики:

1. Для одержання гарних показників відносної стійкості амплітудна характеристика  $20 \lg |G_c G(j\omega)|$  у визначеному інтервалі частот, що прилягає до  $\omega_c$ , повинна мати нахил не більш ніж  $-20$ дб/дек.

2. Точність системи у стійкому режимі повинна бути забезпечена за розрахунок належного підсилення на низьких частотах.

3. Динамічна точність, що визначається смугою пропуску  $\omega_B$ , повинна

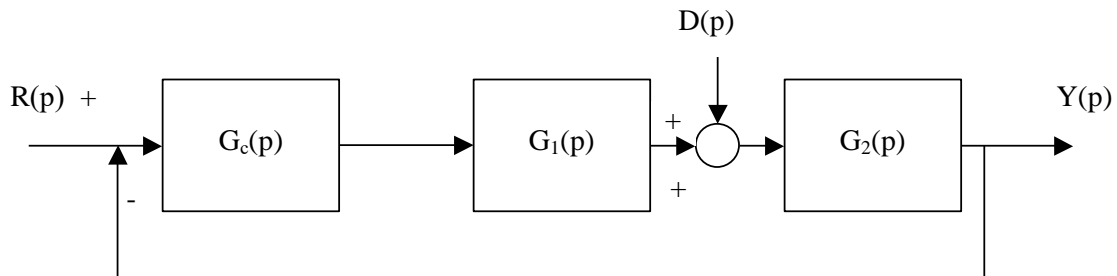
бути гарантована тим, щоб  $|G_c G(j\omega)|$  в цій смузі був не менше заданого значення.

4. Компенсація збурень повинна забезпечуватися за рахунок великого значення  $|G_c(j\omega)|$  у смузі пропускання системи.

Використовуючи поняття чутливості кореня, необхідно вимагати, щоб чутливість  $S'_\alpha$  мала мінімальне значення, тоді як розташування домінуючих коренів  $T(p)$ , повинно забезпечити належну реакцію системи і мінімізувати вплив  $D(p)$ .

І знову ми приходимо до висновку, що необхідне підсилення у контурі в першу чергу повинно бути забезпечено за рахунок  $G_c(p)$ . Припустимо, наприклад, що у системі представленої на рис.11.8 характеристичне рівняння має вид:

$$G_c(p) = K, G_2(p) = 1/p(p+1). \quad (11.21)$$



**Рисунок 11.8. Система з наявними збуреннями**

Крім цього характеристичне рівняння системи має два кореня і ми вибираємо коефіцієнт  $K$  таким чином, щоб мінімізувати  $Y(p)/D(p)$ , мінімізувати  $S'_k$  і щоб домінуючі корені займали бажане положення.

У цьому випадку чутливість кореня:

$$S'_k = \frac{dr}{dK} \cdot \frac{K}{r} = \frac{dp}{dK} \Big|_{p=r} \cdot \frac{K}{r}, \quad (11.22)$$

а характеристичне рівняння має вид:

$$p(p+1) + K = 0.$$

$$\text{Звідси } K = -p(p+1) \text{ і } \frac{dK}{dp} = -(2p+1).$$

Тоді,

$$S_k = -\frac{1}{2p+1} \cdot \frac{|1-p(p+1)|}{p} \Big|_{p=r}. \quad (11.23)$$

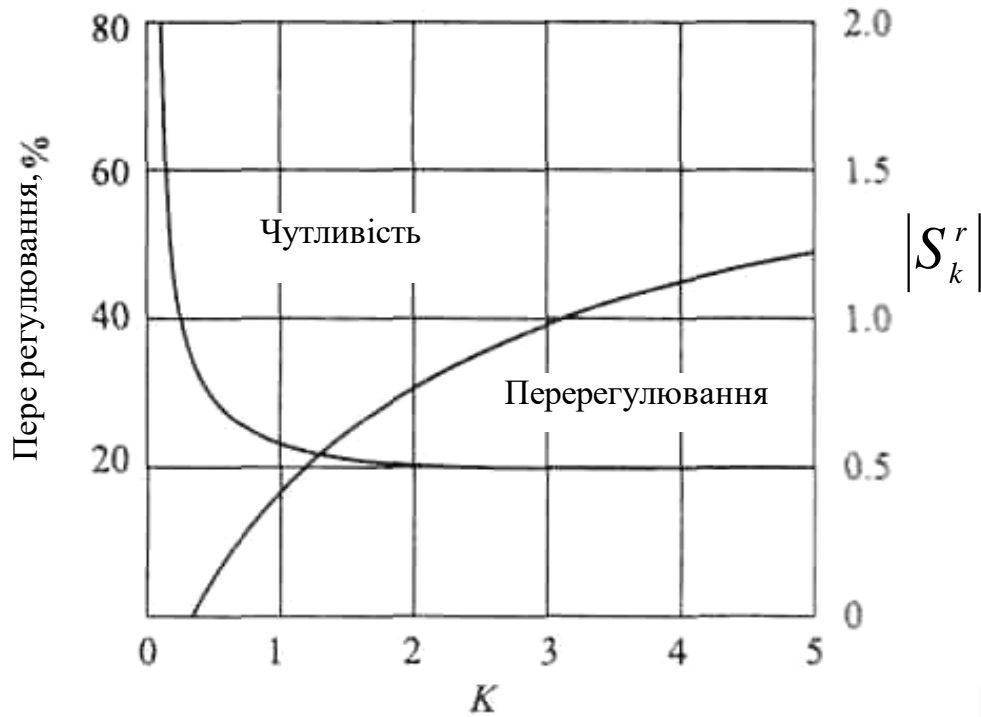
Якщо  $\xi < 1$ , то корені є комплексними і  $r = -0.5 + j\omega$ . Тоді,

$$|S_k^r| = \left( \frac{0.25 + \omega^2}{4\omega^2} \right)^{1/2}. \quad (11.24)$$

На рис.11.9 показана залежність модуля чутливості від  $K$  у діапазоні від  $K=0,2$  до  $K=5$ . На ньому наведений графік для відносного перерегулювання при східчастому вхідному сигналі.

Чутливість в цьому випадку потрібно зменшити, але при цьому обмежити  $K$  значенням 1,5 або ще менше.

В цьому випадку ми досягнемо визначеного компромісу, оскільки одночасно зі зменшенням чутливості зберігається достатня якість при відпрацюванні східчастого вхідного сигналу.



**Рисунок 11.9. Чутливість і відносне перерегулювання системи другого рівня**

В загальному випадку процедуру синтезу можливо звести до таких етапів:

1. Побудувати кореневий годограф скорегованої системи, вибравши  $G_c(p)$  таким чином, щоб забезпечити бажане положення домінуючих коренів.

2. Створити коефіцієнт підсилення  $G_c(p)$  максимально можливим, щоб зменшити вплив збуджень (збурень).

3. Визначити  $S_a^r$  і досягти мінімального значення чутливості при збереженні вимог до перехідної характеристики, що відповідають етапу 1.

В локальних системах управління технологічних процесів виробництва продуктів харчування широке розповсюдження одержали ПІД-регулятори [1,6,13,18,36].

ПІД-регулятор має передавальну функцію:

$$W_c(p) = K_1 + \frac{K_2}{p} + K_3 p. \quad (11.21)$$

Популярність використання ПІД-регуляторів на підприємствах ХП пояснюється тим, що вони працюють у різних стадіях переробки сировини, їх функціональною простотою та робастністю, що створює умови простоти

експлуатації [36].

Щоб використовувати такий регулятор у системі керування конкретним об'єктом, потрібно налагодити три параметри:

коефіцієнт пропорційності, коефіцієнт у каналі інтегрування і коефіцієнт у каналі диференціювання.

Розглянемо ПІД-регулятор виду:

$$W_3(p) = K_1 + \frac{K_2}{p} + K_3 p = \frac{K_3 p^3 + K_1 p + K_2}{p} = \frac{K_3(p^2 + ap + b)}{p} = \frac{K_3(p + z_1)(p + z_2)}{p}, \quad (11.22)$$

$$\text{де } a = \frac{K_1}{K_3} \text{ і } b = \frac{K_2}{K_3}.$$

Таким чином, ПІД-регулятор вносить у передавальну функцію розімкненої системи один плюс, що розташований на початку координат, і два нуля, які потрібно розмістити в будь-якому місці в лівій половині  $p$ -плоскості. Нагадуємо, що кореневий годограф починається у полюсах і закінчується в нулях передавальної функції розімкненої системи. Якщо в системі представлений на рис. 11.8 модель уявити виразом, то:

$$G(p) = \frac{1}{(p + 2)(p + 5)}, \quad (11.23)$$

Використаємо ПІД-регулятор з комплексними нулями, тоді ми можемо одержати кореневий годограф, який показано на рис. 11.10. При збільшенні коефіцієнта  $K_3$  комплексні корені рухаються в сторону нулів. Замкнена система (рис. 11.11) має передавальну функцію

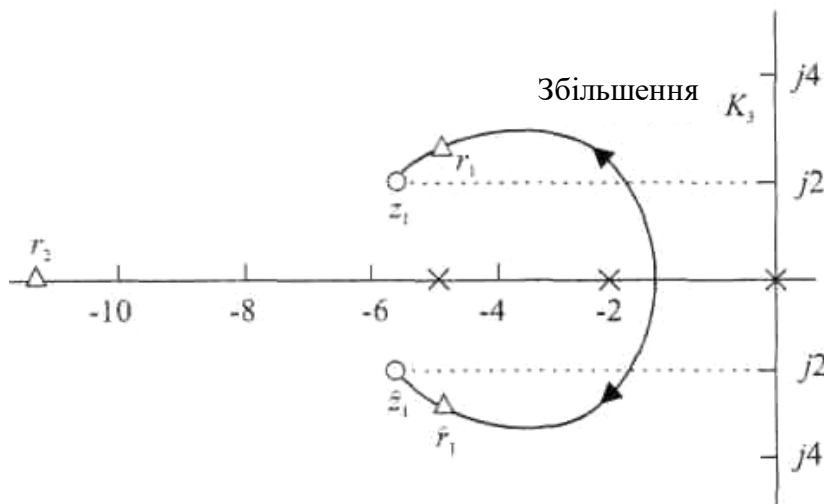
$$T(p) = \frac{G(p)G_c(p)G_p(p)}{1 + G(p)G_c(p)} = \frac{K_3(p + z_1)(p + z_2)}{(p + r_2)(p + r_1)(p + r_1)} \cdot G_p(p) \approx \frac{K_3 G_p(p)}{p + r_2}, \quad (11.24)$$

так як нулі і комплексні корені приблизно рівні ( $r_1 \approx r_2$ ).

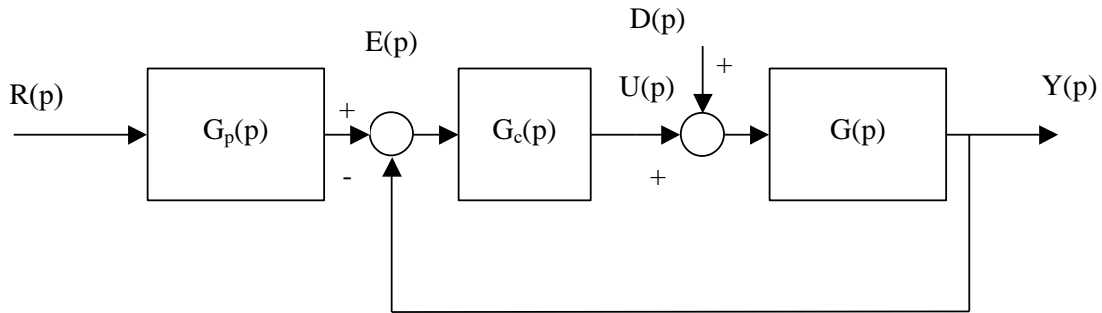
Припустимо, що  $G_p(p) = 1$ , одержимо:

$$T(p) = \frac{K_3}{p + r_2} \approx \frac{K_3}{p + K_3}, \quad (11.25)$$

якщо  $K_3 \geq 1$ .



**Рисунок 11.10. Кореневий годограф при наявності нуля  $z_1 = -6 + 2j$ .**



**Рисунок 11.11. Система керування зі зворотнім зв'язком.  $R(p)$  – заданий еталонний сигнал,  $D(p)$  – небажане збурення**

Єдиним обмежуючим фактором є допустимі величини сигналу  $U(t)$  (див. рис.11.11) при значних  $K_3$ .

Якщо взяти  $K_3=100$ , то система буде мати високу швидкодію і нульову помилку. Крім того суттєво буде зменшений вплив збурень.

Крім цього відмітимо, що ПД-регулятори особливо корисні з точки зору зменшення встановленої помилки і покращання виду перехідної характеристики, коли об'єкт керування  $G(p)$  має один або два полюси (або може бути апроксимований моделлю другого порядку).

Перейдемо тепер до синтезу робастної системи з ПД-регулятором.

Вибір трьох коефіцієнтів ПД-регулятора по суті є задачею знаходження потрібної крапки у трьохмірному просторі. Кожна крапка цього простору відповідає різним комбінаціям трьох параметрів ПД-регулятора. Вибираючи різні крапки в просторі параметрів, ми можемо, наприклад, одержати різний вид реакції системи на східчастий вхідний сигнал. ПД-регулятор можливо підібрати шляхом пошуку потрібної крапки в просторі параметрів методом проб і помилок.

Головна проблема у виборі вказаних трьох коефіцієнтів полягає у тому, що цим коефіцієнтам не так-то просто поставити у відповідність показники якості і робастності, які хотів би мати проєктувальник системи керування. Для рішення цієї проблеми були запропоновані ряд правил і методів [11, 23, 24, 25].

В цій темі ми розглянемо методи, пов'язані з використанням кореневого годографу і оцінок якості [3,9,12].

Перший метод синтезу базується на використанні оцінки якості (ІЗМП) – інтегралу від зваженого модуля помилки:

$$ІЗМП = \int_0^T t |e(t)| dt, \quad (11.25)$$

і оптимальних значень коефіцієнтів характеристичного поліному замкнутої системи (див. табл. 11.1 для східчастого і табл.11.2 для лінійного вхідного сигналів).

Таким чином, ми можемо вибрати три коефіцієнта ПД-регулятора, що мінімізують оцінку ІЗМП, при якій система має гарну реакцію на ступеневий (рис.11.12) або лінійний сигнали.

Процедура синтезу включає в собі наступні етапи:

1. По заданому часу встановлення визначити параметр  $\omega_n$  замкненої системи.

2. Використовуючи відповідні значення із табл. 11.1 і значення  $\omega_n$  із етапу 1, визначають три коефіцієнта передавальної функції  $G_c(p)$ .

3. Визначити попередній фільтр  $G_p(p)$  таким чином, щоб передавальна функція замкненої системи не мала нулів, як того вимагає вираз замкненої системи загального виду:

$$T(p) = \frac{Y(p)}{R(p)} = \frac{b_0}{p^i + d_{n-1}p^{n-1} + \dots + b_1p + b_0}. \quad (11.26)$$

### Таблиця 11.1.

Оптимальні значення коефіцієнтів  $T(p)$ , що базуються на критерії ІЗМП, при східчастому вхідному сигналі:

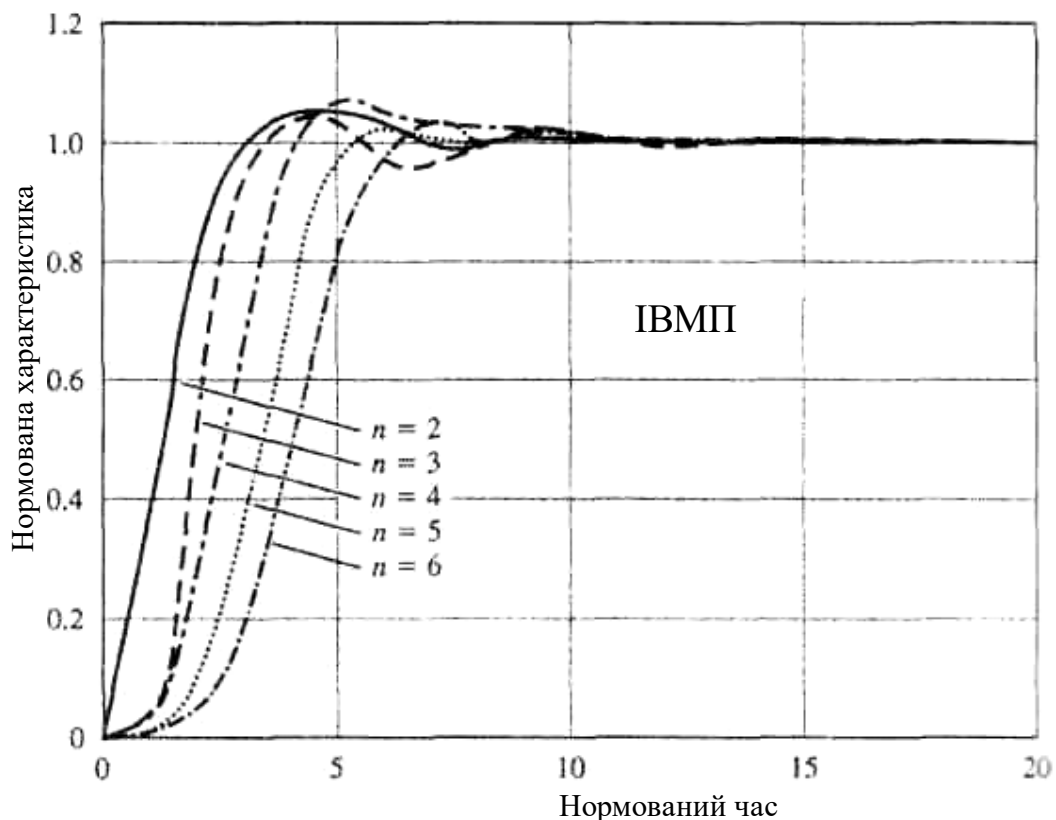
$$\begin{aligned} & p + \omega_i \\ & p^2 + 1.4\omega_i p + \omega_i^2 \\ & p^3 + 1.75\omega_i p^2 + 2.15\omega_i^2 p + \omega_i^3 \\ & p^4 + 2.1\omega_i p^3 + 3.4\omega_i^2 p^2 + 2.7\omega_i^3 p + \omega_i^4 \\ & p^5 + 2.8\omega_i p^4 + 5.0\omega_i^2 p^3 + 5.5\omega_i^3 p^2 + 3.4\omega_i^4 p + \omega_i^5 \\ & p^6 + 3.25\omega_i p^5 + 6.60\omega_i^2 p^4 + 8.60\omega_i^3 p^3 + 7.45\omega_i^4 p^2 + 3.95\omega_i^5 p + \omega_i^6 \end{aligned}$$



**Таблиця 11.2.**

Оптимальні значення коефіцієнтів  $T(p)$ , що базуються на критерії ІЗМП, при лінійному вхідному сигналі:

$$\begin{aligned}
 & p^2 + 3.2\omega_i p + \omega_i^2 \\
 & p^3 + 1.75\omega_i p^2 + 3.25\omega_i^2 p + \omega_i^3 \\
 & p^4 + 2.41\omega_i p^3 + 4.93\omega_i^2 p^2 + 5.14\omega_i^3 p + \omega_i^4 \\
 & p^5 + 2.19\omega_i p^4 + 6.50\omega_i^2 p^3 + 6.30\omega_i^3 p^2 + 5.24\omega_i^4 p + \omega_i^5
 \end{aligned}$$



**Рисунок 11.12. Перехідна характеристика САК процесів з виробництва продуктів харчування**

Розглянемо більш детально типову систему керування об'єктом виробництва з ПІД-регулятором і проведемо синтез такої робастної системи [9].

Типова САК виробництва продуктів харчування з ПІД-регулятором в системі, що наведена на рис.11.11. і характеризується значними запізнюваннями, в якій:

$$G(p) = \frac{K e^{-0.1p}}{0.1p + 1} \quad (11.27)$$

При цьому  $K=20$ , щоб забезпечити малу помилку встановлення при східчастому входному сигналі і  $G_p(p)=1$ . Для таких систем потрібне перегулювання менше 5%.

Якщо побудувати частотно-фазову характеристику системи для  $G(j\omega)$ , то ми бачимо, що система має від'ємний запас стійкості по фазі і, відповідно, нестійка.

Задаємося бажаним запасом по фазі  $70^\circ$  і для досягнення цього використаємо ПД-регулятор виду:

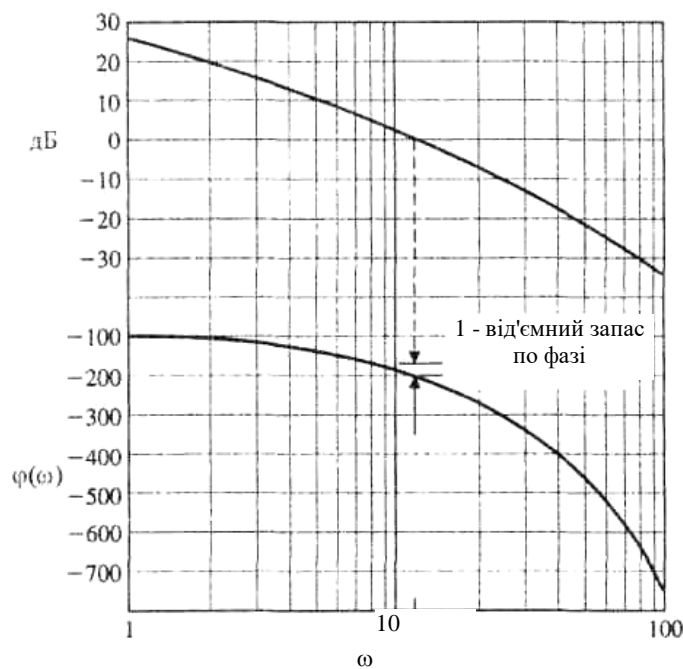
$$G_c(p) = \frac{K(\tau_1 p + 1)^2}{p} \quad (11.28)$$

Тоді передавальна функція замкненої системи приймає вид:

$$GG_c(p) = \frac{20e^{-0.1p}(\tau_1 p + 1)^2}{p(0.1p + 1)}, \quad (11.29)$$

де  $K_2 K = 20$ .

Побудувавши частотно-фазову характеристику без врахування двох нулів (рис.11.13), ми знайдемо, що запас по фазі дорівнює  $-32^\circ$ , тобто система нестійка.



**Рисунок.11.13. Частотно-фазова характеристика типової САК збагачувального виробництва для  $G(p)/p$**

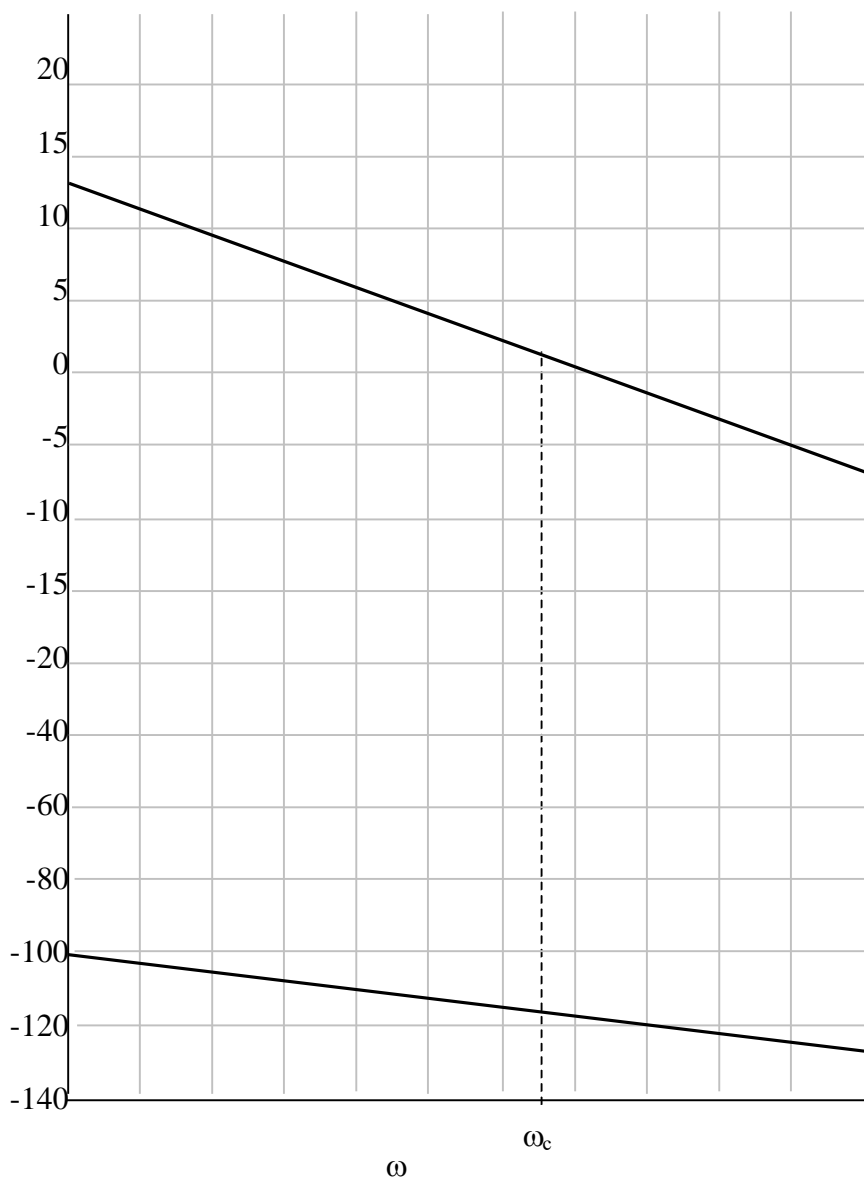
Оскільки введення ПД-регулятора додає у передавальну функцію розімкненої системи полюс на початку координат, то це забезпечує встановлену помилку і ми маємо право зменшити  $K_2 K$ .

Із рис.11.13 слідує, що  $\omega_n = 11$ , тому вибираємо нулі так, щоб вони були близькими до цього значення, наприклад, приймаємо  $\omega = 16.7$ .

Тоді  $\tau_1 = 0.06$  і, якщо зменшити коефіцієнт підсилення до  $K_2K = 4.5$ , то одержимо передавальну функцію скорегованої системи:

$$G_c G(p) = \frac{4.5(0.06p + 1)^2 e^{-0.1p}}{p(0.1p + 1)}. \quad (11.30)$$

Відповідно (11.30) частотно-фазова характеристика наведена на рис.11.14. В цьому випадку ми маємо нове значення  $\omega_n = 4.5$  і запас по фазі  $70^\circ$ . Перехідна характеристика системи не має пере регулювання, а час установа (за критерієм 2%) дорівнює 0,8с, що задовольняє вимогам до таких систем. Якщо продовжити синтез системи, то при збільшенні  $K_2K$  до 10 і дещо збільшити швидкодію системи пере регулювання залишиться на рівні менше 5%.



**Рисунок 11.14. Частотно-фазова характеристика типової САК виробництва продуктів харчування для  $G_c G(p)$**

Завершуючи вивчення синтезу робастних систем з ПД-регуляторами, відмітимо, що для цієї цілі можливо використати ще одну методику кореневого годографа [3,9].

Відповідна процедура включає в собі наступні етапи:

1. Розташувати на  $p$ - площині полюси і нулі функції  $G(p)/p$ .
2. Вибрати положення нулів  $G_c(p)$  таким чином, щоб забезпечити належний вид кореневого годографа і бажане розташування домінуючих коренів.
3. Визначити вид перехідної характеристики скорегованої системи і, якщо необхідно, повторити етап 2.

### **Контрольні запитання**

1. Навести основні характеристики робастних систем керування.
2. Поясніть умови робастності систем автоматичного керування.
3. Вкажіть відмінність синтезу робастних систем.
4. Наведіть умови забезпечення заданого значення запасу стійкості.
5. В чому полягає чутливість і відносне пере регулювання робастної системи другого рівня?
6. Чим відрізняється робастні П,ПІ,ПІД-регулятори ?
8. Чим пояснюється популярність використання робастних ПІД-регуляторів на підприємствах харчової промисловості?
9. В чому полягає відмінність налагодження робастних ПІ та ПІД-регуляторів?

## Тема12. Адаптивні системи керування

### 12.1. Принципи проєктування адаптивних систем керування виробництвом продуктів здорового харчування

Теорія адаптивних систем виникла в зв'язку з необхідністю рішення широкого класу прикладних задач, для яких неможливо використовувати традиційні методи проєктування систем. На практиці в умовах виробництва продукції харчування побудована система, що базується на традиційних методах проєктування систем автоматичного керування (САК). Вона є мало перспективною. Це пов'язано з тим, що характеристики об'єктів харчової промисловості змінюються в процесі функціонування, а їх динамічні характеристики залежать від різновидностей сировини, технологічних параметрів обладнання і інших технологічних апаратів, їх стану, зносу і т.п.

В цих умовах традиційні методи не забезпечують заданих параметрів якості САК [3,6,13]. З метою суттєвого зменшення впливу невизначеності на якість роботи САК проєктувальники використовують ефект пристосування до умов функціонування [1].

Система керування, у якій автоматично визначається потрібний закон керування за рахунок аналізу поведінки об'єкту в процесі поточного керування, називається адаптивною. Адаптивні системи можливо розділити на два великих класи: самоорганізаційні і самоналагоджувальні [1,2,3].

У самоорганізаційних системах в процесі функціонування виникає формування алгоритму керування (його структури і параметрів), що дозволяє оптимізувати систему, з точки зору, поставленої цілі керування (ЦК).

В класі самоналагоджувальних систем (СНС), в яких структура регулятора задана (або вибрана) і лише потрібно визначити лише алгоритм налагодження його коефіцієнтів (алгоритм адаптації). СНС розділяються на два підкласи: пошукові і безпошукові [13].

У пошукових СНС мінімум (або максимум) міри якості шукають за допомогою спеціально організованих пошукових сигналів [16]. Найпростішими пошуковими системами є більшість екстремальних систем, в яких вада апріорної інформації доповнюється за рахунок поточної інформації, одержаної у вигляді реакції об'єкту на штучно внесені пошукові (пробні або тестові) впливи.

У безпошукових системах СНС у явному вигляді є модель з бажаними динамічними характеристиками. Завдання алгоритму адаптації полягає у налагодженні коефіцієнтів регулятора таким чином, щоб звести неузгодженість між об'єктом керування і моделлю до нуля. Таке керування називають прямим адаптивним керуванням (directadaptivecontrol), а системи – адаптивними системами з еталонними моделями (modelreferenceadaptivesystem). У випадку непрямого адаптивного керування (indirectadaptivecontrol) спочатку проводять ідентифікацію об'єкту, а потім визначають відповідні коефіцієнти регулятора. Такі регулятори називають самоналагоджувальними (self-turningregulators) [1,2].

У безошукових самоналагоджувальних системах еталонна модель може бути реалізована у вигляді реальної динамічної ланки (явна модель) або бути присутньою у вигляді деякого еталонного управління, що зв'язують керовані змінні і їх похідні (неявна модель).

В неявній моделі коефіцієнти еталонного рівняння є параметрами алгоритму адаптації. Розглянемо задачу синтезу адаптивної системи управління типовим збагачувальним процесом. Обмежимося розглядом задачі синтезу для неперервних динамічних об'єктів. Нехай на об'єкт управління (ОУ) впливають впливи, які можливо задавати або вимірювати,  $Y=Y(t)$ , не вимірювані впливи;  $N=N(t)$  і керовані впливи  $U=U(t)$ . Наглядачу доступні вихідні змінні об'єкту  $X=X_B(t)$ . Поведінка об'єкту залежить від ряду невідомих параметрів, сукупність яких позначимо через  $\xi$ . Задана множина  $\Sigma$  можливих значень  $\xi$ , що визначає клас допустимих об'єктів виробництва і впливів.

Задана ціль керування, яка визначає бажану поведінку ОК (об'єкту керування).

Потрібно синтезувати алгоритм керування, який використовує вимірювання або розраховані на основі виміру величини, не залежні від  $\xi \in \Sigma$  і, забезпечуючи для кожного  $\xi \in \Sigma$  досягнення заданої ЦК.

Вектор невідомих параметрів  $\xi$  загалом складається із коефіцієнтів рівнянь, як складових математичного опису об'єкту, а також із коефіцієнтів, визначаючих зміни зовнішніх впливів (стану середовища).

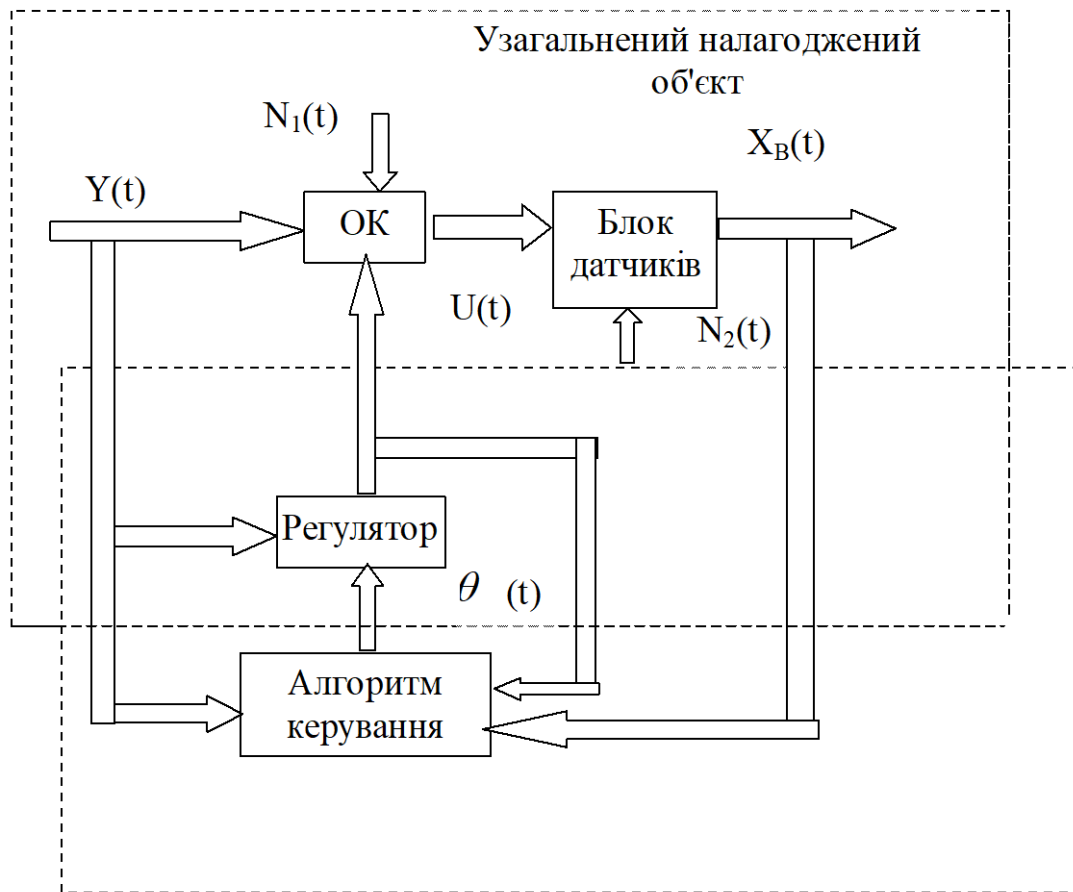
Крім того, вектор  $\xi$  може вміщувати (містити) абстрактні параметри, що описують невимірювані впливи, обумовлені неточністю опису ОК.

Вектор  $\xi$ , як правило, вважається для об'єктів харчового виробництва квазістаціонарним: постійним або таким, який змінюється повільно (повільніше динамічних процесів на об'єкті, змін зовнішніх впливів).

У подальшому будемо говорити, що процес (вектор)  $\bar{z}$  системи, що розглядається квазістаціонарний, якщо він змінюється суттєво повільніше інших динамічних процесів, що протікають в системі. Описана вище задача є задачею керування в умовах невизначеності, зв'язаної з  $\xi \in \Sigma$ . Задача може бути вирішена поетапно: спочатку виконується ідентифікація вектора  $\xi$ , а потім визначається алгоритм керування, що забезпечує потрібну якість функціонування одним із традиційних методів.

Але така стратегія синтезу потребує додаткового часу на вивчення об'єкту і непридатна у нестаціонарних умовах. Найбільш удосконаленою стратегією керування є адаптивна стратегія, яка полягає в одночасному вивченні об'єкту і управління ним.

Алгоритм адаптивного керування має дворівневу структуру, яка наведена на рис.12.1.



**Рисунок 12.1. Структурна схема адаптивної системи керування**

Алгоритм 1-го рівня (алгоритм регулювання або алгоритм основного рівня) залежить від вектора параметрів  $\theta$  (вектора параметрів регулятора), при кожному  $\xi \in \Sigma$  він повинен забезпечувати досягнення ЦУ при відповідному виборі  $\theta = \theta(\xi)$ . Алгоритм 2-го рівня змінює (налагоджує) вектор  $\theta$  таким чином, щоб забезпечити досягнення ЦУ при невідомих  $\xi \in \Sigma$ . Сукупність алгоритмів регулювання і адаптації будемо називати алгоритмом адаптивного керування, а динамічна система, яка складається із об'єкту і пристрою, що реалізує алгоритм адаптивного керування – адаптивною системою керування (АДСК). Формалізуємо задачу синтезу. Нехай неперервна динамічна система, так названа “узагальнений об'єкт”, описується рівнянням стану

$$\dot{X} = F(X, Y, U, N_1, \xi, t), \quad (12.1)$$

$$X_B(t) = G(X, Y, U, N_2, \xi, t), \quad (12.2)$$

де  $F(\cdot), G(\cdot)$  - відомі вектор функції,  $N_1, N_2$  – впливи на ОУ і збурення вимірів;  $X \in \mathbb{R}^n, U \in \mathbb{R}^m, Y \in \mathbb{R}^r, X_B \in \mathbb{R}^i$  - вектори станів, керування, зовнішніх входів і виходів ОУ відповідно.

В рівняння (12.1), (12.2) крім самого об'єкту керування рівняння виконавчих, вимірюваних пристроїв, еталона модель і т.п.

У простому вигляді ціль керування (ЦК) задається у вигляді цільової нерівності

$$q \leq \Delta \text{ при } t \geq t_*, \Delta \geq 0, \quad (12.3)$$

де  $q(t) = q(X(t), U(t))$  - невід'ємна цільова функція.

В задачах слідкування в якості цільової функції вибирається функція відхилення між дійсною і бажаною траєкторією руху об'єкту  $q = q(E(t)t), E(t) = X(t) - X_M(t)$ .

Бажана поведінка системи може бути заданою, наприклад, за допомогою еталонної моделі:

$$\dot{X}_M(t) = F_M(X_M, Y, t), \quad (12.4)$$

де  $X_M \in R^n$  - вектор станів еталонної моделі;  $Y \in R^r$  - вектор задаючих впливів. В приватному випадку при  $X_M(t) = 0$  (задача стабілізації) одержуємо цільову функцію поточного стану об'єкту  $q = q(X(t)t)$ . Задача синтезу полягає у знаходженні алгоритму керування із заданого класу дворівневих алгоритмів виду:

$$U(t) = U_i(X(t), U(t), \theta(t), Y(t)), \quad (12.5)$$

$$\theta(t) = \theta_i(X(t), U(t), \theta(t), Y(t)), \quad (12.6)$$

забезпечуючих досягнення ЦК (12.1) у системі (12.3), (12.4), (12.5), (12.6) для кожного  $\xi \in \Sigma$ . Тут  $U_i(\cdot), \theta_i(\cdot)$  - деякі оператори.

Якщо АДСК функціонує в стохастичному середовищі, то цільовий простір (12.3) змінюється "усередненою" ціллю:

$$Mq \leq \Delta \text{ при } t \geq t_{B*}, \Delta \geq 0. \quad (12.7)$$

Система (12.1), (12.2), (12.5), (12.6) називається адаптивною в класі  $\Sigma$  по відношенню до цілі керування, заданої однією із нерівностей (12.3), (12.7), якщо для кожного  $\xi \in \Sigma$  і при кожних початкових умовах  $X(0), U(0), \theta(0)$  виконується відповідна нерівність (12.3) або (12.7).

В адаптивних системах обов'язковим є контур адаптації, тоді для формулювання задачі синтезу алгоритму адаптації необхідно використати поняття "узагальненого налагодженого об'єкту" (УНО).

Узагальнений налагоджений об'єкт включає в собі всю незмінну частину системи ("узагальнений об'єкт" і регулятор основного контуру).

В якості входів (УНО) можуть виступати як налагоджувальні параметри регулятора (12.5)  $\theta(t)$  (див. рис.12.1), так і входи узагальненого об'єкту  $U(t)(\theta(t)=U(t))$ , якщо основний контур керування відсутній. При цьому формально опис системи в формулах (12.1), (12.2) або у формулі (12.5)-(12.6) представляє собою систему алгебраїчних і диференціальних рівнянь.

У першому випадку задача полягає у синтезі алгоритму адаптивного керування (12.5), (12.6), а в другому випадку – алгоритму адаптації (12.6). в рамках наведених вище схем потрібно розглянути також нестационарні задачі, в яких вектор невідомих параметрів  $\xi$  змінюється в часі ( $\xi = \xi(t)$ ).



При цьому вектор “ідеальних”, з точки зору ЦК, параметрів регулятора  $\theta$  також залежить від часу. Алгоритм адаптивного керування для досягнення цілі повинен “відслідковувати” дрейф невідомих параметрів, головне пристосовуючись до зміни умов.

Зрозуміло, що така поведінка системи можлива лише при повільних змінах  $\xi$  в порівнянні зі змінами стану об'єкту  $X$ , коли в процесі вимірів накопичується достатня інформація про дрейф. При цьому швидкі процеси керування першим рівнем системи-регулятором, а повільні зміни відслідковуються другим рівнем-адаптером. Дворівнева система керування знаходиться у відповідності з розподілом руху об'єкту на швидкі (координатні) і повільні (параметричні).

Припущення про повільні зміни невідомих параметрів (гіпотеза квазістаціонарності) практично означає, що параметри об'єкту вважаються постійними “замороженими”.

Якщо ж швидкість зміни  $\xi$  порівняна зі швидкістю процесів на об'єкті і змінами зовнішніх збуджень, то необхідно задатися законом дрейфу  $\xi$ , а параметри закону вважати новими параметрами. Цим самим задача зведена до квазістаціонарності. Перейдемо тепер до синтезу основного контуру. Найбільше розповсюдження одержали наступні методи:

1. Метод інваріантності, що реалізує ідею вибору “ідеального” управління, із рівності правих частин еталонної моделі і моделі об'єкту керування [12,13];

2. Метод модального керування, в якому “ідеальне” керування вибирається, виходячи із бажаних показників якості перехідного процесу;

3. Оптимальний синтез, в якому обчислюється задача оптимізації по управлінському впливу деякого асимптотичного (при  $t \rightarrow \infty$ ) показника якості.

Основними методами синтезу алгоритмів адаптації є:

1) Градієнтні методи. Алгоритм змін налагодження параметрів будується у напрямку антиградієнта цільової функції чутливості, яка залежить від параметрів об'єкту, що є протиріччям щодо постановки задачі адаптивного керування. Це долається приблизним обчисленням функції чутливості з використанням еталонної моделі [12].

2) Методи, основані на використанні функцій Ляпунова. Велику кількість алгоритмів цієї групи можливо одержати в рамках схеми швидкого градієнту. У методі використовується той випадок, що градієнт цільової функцій близький до напрямку з градієнтом її прирощення у часі. Алгоритм адаптації будується в антиградієнтному напрямку від швидкості зміни цільової функції [12,13,15].

Метод забезпечує існування функції Ляпунова у вигляді суми цільової функції і квадрату відхилення між налагодженими і ідеальними параметрами.

3) Методи, основані на теорії гіперстійкості. Синтез контуру адаптації виконується із умови гіперстійкості системи з адаптивним регулятором [2,15].

4). Методи, основані на організації режимів ковзання. При виникненні режиму ковзання система набуває якість інваріантності по відношенню до параметричних збурень і завадам.

До цієї групи примикають системи із сигнальною адаптацією, одержані на основі схеми швидкісного градієнту.

5). Методи, основані на введенні “нескінчено-великого” коефіцієнту підсилення. В методі використовується нескінчено-великий коефіцієнт підсилення, за рахунок якого передавальна функція системи стає еквівалентною передавальній функції еталонної моделі. Головні недоліки методу: можлива втрата стійкості при великому коефіцієнті підсилення, слабка завада – захищеність [3,9].

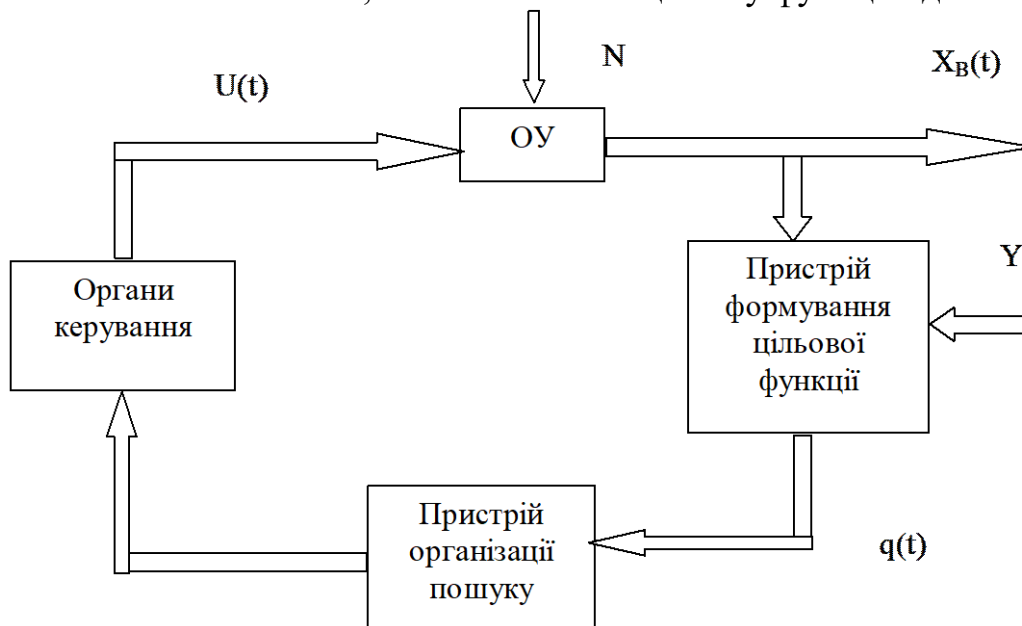
Системи, що побудовані на основі методів четвертої і п'ятої групи, часто називають системами з адаптивними якостями, оскільки в них відсутній контур налагодження параметрів.

## 12.2. Пошукові адаптивні системи керування

В пошукових адаптивних системах (ПАС) вибір напрямку налагодження параметрів, для забезпечення екстремального значення міри якості, виконується на основі організації спеціальних пошукових сигналів. Найпростішими ПАС є більшість екстремальних систем.

Типова блок-схема екстремальної системи керування представлена на рис.12.2. На вхід об'єкта подають пошукові впливи і оцінюється реакція об'єкту, що проявляється в зміні цільової функції  $q(t)$ .

Визначаються ті впливи, які наближають цільову функцію до екстремуму.



**Рисунок 12.2. Структурна схема екстремального регулятора.**

Екстремальні системи класифікуються по способу пошуку екстремуму: системи з регулярним пошуком і випадковим пошуком. До регулярних методів відносяться гарно відомі методи повного перебору Гауса-Зейделя, градієнтного пошуку і їх модифікації. У випадкових методах напрямок пошуку знаходиться випадковим способом. Для виробництва продуктів харчування екстремальні системи розроблені авторами [5,13] знайшли використання для оптимізації

процесів виробництва хліба та макаронних виробів.

Перейдемо до аналізу і сфери використання пошукових алгоритмів непрямого адаптивного керування з налагодженою моделлю. Непряме адаптивне керування пов'язане з рішенням задачі у два етапи. На першому етапі виконується ідентифікація об'єкту. На другому етапі – вибір коефіцієнтів регулятора.

В пошукових системах ідентифікації вимірюють вхідні і вихідні сигнали об'єкту, але ведеться активний пошук, який супроводжується випробуваннями адаптивної моделі по параметричним каналам. При цьому розширюються межі працездатності систем ідентифікації з адаптивною моделлю.

В основі пошукових систем можуть використовуватися прості методи пошуку екстремуму, починаючи від найпростішого перебору параметрів і, закінчуючи градієнтними методами, а також їх комбінаціями.

Загальна структурна схема пошукової ідентифікації представлена на рис.12.3.

Завданням алгоритму пошукового налагодження є зміна параметрів моделі  $\theta_M$ , таким чином, щоб мінімізувати цільову функцію відхилення  $q(E)$ .

Розглянемо більш детально неперервний градієнтний алгоритм ідентифікації із синхронним детектуванням [3,9,17].

Нехай об'єкт і модель описується рівнянням станів:

$$\dot{X} = F(X, Y, \theta, t, N_1), \quad X_B = G(X, Y, t) + N_2, \quad (12.8)$$

$$\dot{X}_M = F_M(X_M, Y, \theta_M, t), \quad X_{B.M} = G_M(X_M, Y, t), \quad (12.9)$$

де  $X \in R^n$ ,  $X_M \in R^n$ ,  $X_B \in R^1$ ,  $X_{B.M} \in R^1$ ,  $\theta \in R^{\bar{m}}$ ,  $\theta_M \in R^{\bar{m}}$ ,  $Y \in R^m$  - вектори станів, виходів, параметрів і входів об'єкту і моделі відповідно;  $N_1, N_2$  – вектори збурень і перешкод вимірів.

Метою ідентифікації є мінімізація цільової функції  $q(E)$  відхилення:

$$E = X_B - X_{B.M}. \quad (12.10)$$

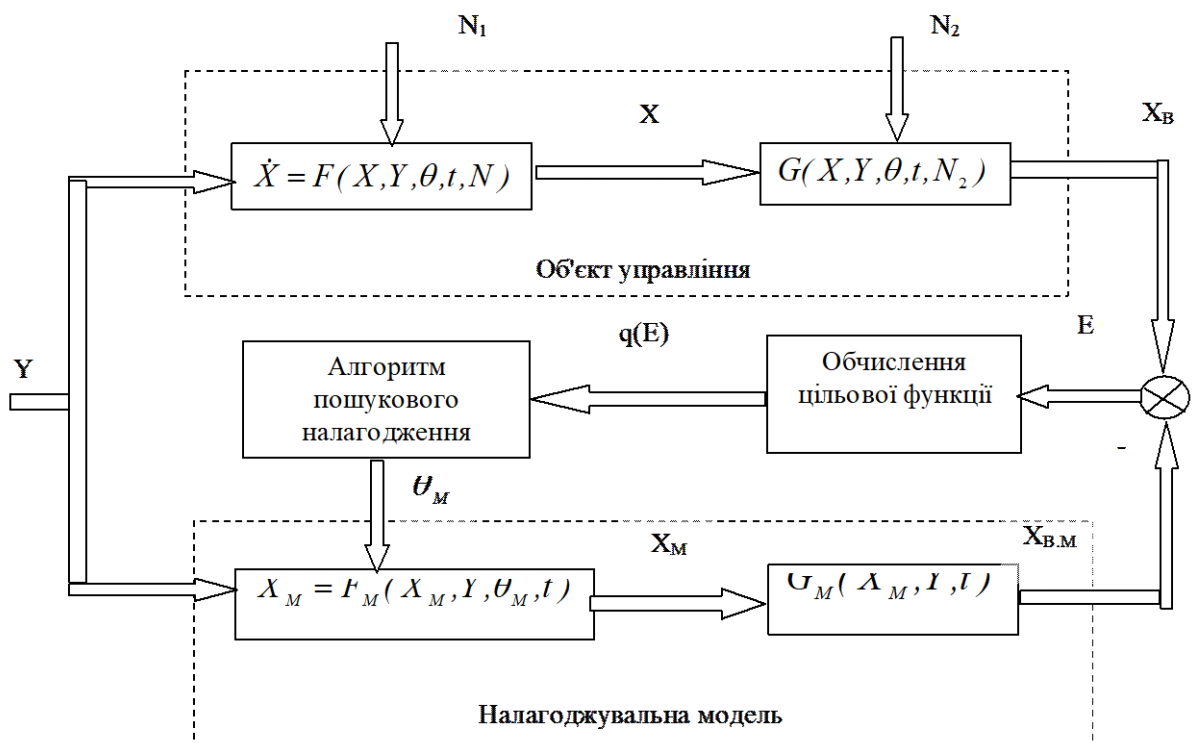
При цьому вважають, що  $q(E)$  – випукла, позитивна визначена функція, а налагоджувальна модель – спостерігається, а тому відомі поточні значення  $X_M, \dot{X}_M, \theta_M$ .

Налагодження параметрів моделі будемо виконувати у напрямку антиградієнту цільової функції:

$$\dot{\theta}_M = -\Gamma \nabla_{\theta_M} q(E), \quad (12.11)$$

де  $\Gamma = \Gamma^T > 0$  –  $(\bar{m} \times \bar{m})$  – матриця коефіцієнтів підсилення;

$\nabla_{\theta_M} q(E) = \left[ \frac{\partial q(E)}{\partial \theta_M} \right]^T$  - градієнт цільової функції по параметрам моделі.



**Рисунок 12.3. Структурна схема пошукової ідентифікації.**

Для виконання градієнтного методу необхідно визначити:

$$\frac{\partial q(E)}{\partial \theta_M} = -\frac{\partial q(E)}{\partial E} \times \frac{\partial G_M}{\partial X_M} \times \frac{\partial X_M}{\partial \theta_M}. \quad (12.12)$$

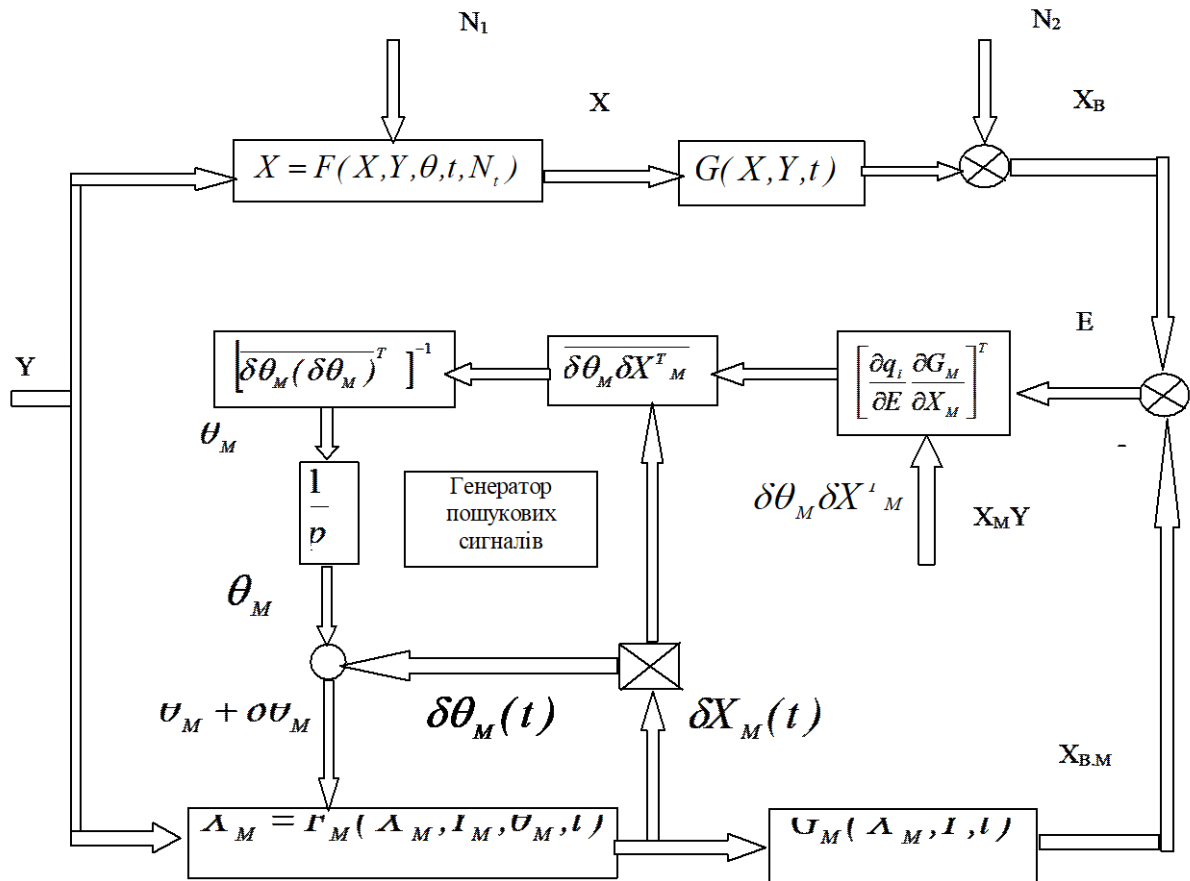
Основна трудність в обчисленні правої частини рівняння (12.12) полягає у визначенні  $\frac{\partial X_M}{\partial \theta_M}$ . Алгоритм налагодження параметрів (12.11) з врахуванням перетворень [13] приймає вигляд:

$$\begin{aligned} \theta_M &= -\Gamma \nabla_{\theta_M} q(E) = \Gamma \left\{ \frac{\partial q}{\partial E} \frac{\partial G_M}{\partial X_M} \left( \frac{1}{p} \frac{\partial F_M}{\partial \theta_M} \right) \right\}^T = \\ &= \Gamma \left\{ \overline{\delta \theta_M} (\delta \theta_M)^T \right\}^{-1} \overline{\delta \theta_M} (\delta X_M)^T \left( \frac{\partial q}{\partial E} \frac{\partial G_M}{\partial X_M} \right)^T \end{aligned} \quad (12.13)$$

В цій формулі  $p=d/dt$  – символ диференціювання у часі.

Для обчислення  $\frac{1}{p} \frac{\partial F_M}{\partial \theta_M}$  використана процедура синхронного детектування, а пошукові сигнали вибрані із умови невиродженості матриці  $\delta \theta_M (\delta \theta_M)^T$ .

Структурна схема системи ідентифікації представлена на рис.12.4.



**Рисунок 12.4. Структурна схема пошукової системи з градієнтним алгоритмом.**

Відмітимо, що термін синхронне детектування пов'язаний зі зміною варіації  $\delta X_M(t)$  синхронно зміни варіації  $\delta \theta_M$  (пошук сигналів) відповідно залежності:

$$\delta X_M \approx \frac{1}{p} \frac{\partial F_M}{\partial \theta_M} \delta \theta_M,$$

при достатньому високочастотному сигналі  $\delta \theta_M$ , а також з можливістю детектування (виділення) градієнту на основі вимірювання величин шляхом їх усереднення (порівняйте (12.12) і (12.13)).

Умови використання алгоритму:

- 1) Цільова функція  $q(E)$  – позитивно визначена і випукла по  $E$ ;
- 2) Різниця в структурі моделі об'єкта, а також початкова неузгодженість векторів  $\theta$  і  $\theta_M$  забезпечують єдине значення екстремуму цільової функції;
- 3) Пошукові сигнали  $\delta \theta_M$  - незначні і центровані, задовольняють умовам квазістаціонарності процесу  $X_M(t)$  і невиродженості матриці  $\overline{\delta \theta_M (\delta \theta_M)^T}$ .

### 12.3. Безпошукові адаптивні системи керування

Розглянемо задачу керування суттєво нестационарними об'єктами, динамічні і статистичні параметри яких змінюються у широких діапазонах. Ця задача керування потребує розробки в класі систем зі змінною структурою (СЗС) принципово нових способів побудови безпошукових адаптивних систем керування об'єктами виробництва продуктів харчування [1,13].

Під об'єктом керування будемо розуміти об'єкт, поведінка якого може бути описана рівнянням виду:

$$\sum_{i=2}^{n+1} a_i x^{(i-1)}(t) + x(t) = f(t) + K_0 U(t), \quad (12.14)$$

де  $a_i$  і  $K_0$  – змінні параметри, що приймають значення із діапазонів

$$0 < a_{i_{\min}} < a_i < a_{i_{\max}} < \infty, \quad (12.15)$$

$$0 < K_{0_{\min}} < K_0 < K_{0_{\max}} < \infty, (i = 2, \dots, n + 1).$$

Утім характеристичне рівняння:

$$\sum_{i=2}^{n+1} a_i \lambda^{i-1} + 1 = 0, \quad (12.16)$$

має від'ємні корені.

Керувати об'єктом (12.14) будемо за допомогою лінійного ПД-закону керування:

$$U(t) = K_p \varepsilon_1(t) + \int_0^t K_i \varepsilon_1(\tau) d\tau + K_g \varepsilon_1(t), \quad (12.17)$$

де

$$\begin{aligned} \varepsilon_1(t) &= q(t) - y(t) \\ \tau \dot{y}(t) + y(t) &= x(t) \end{aligned} \quad (12.18)$$

$\varepsilon_1(t)$  – помилка регулювання;

$q(t)$  – заданий вплив;

$x(t)$  – керована координата об'єкту (12.14);

$K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_g$  і  $t_1$  - налагоджувальні параметри ПД-закону керування.

Керування об'єктом (12.14) будемо шляхом корекції коефіцієнтів  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_g$ .

Перепишемо рівняння виду (12.14) з врахуванням (12.15) відносно вихідної координати фільтра:

$$\sum_{i=1}^{n+1} a_{ii} y^{(i)}(t) + y(t) = f(t) + K_0 U(t), \quad (12.19)$$

де  $a_{ii} = \tau_1 a_{i-1} + a_i, (i = 1, \dots, n + 1),$

$y^{(i)}(0) = 0 (i = 0, \dots, n).$

Потрібно сформулювати таке  $U(t)$ , яке б забезпечувало при різних значеннях  $a_i$  і  $K_0$  (12. 15) якість керування, близьке до якості оптимально налагоджених для кожного сполучення  $a_i$  і  $K_0$  лінійних ПД-законів керування.

Управління  $U(t)$  (12.17) будемо шукати у вигляді:

$$U(t) = U_p(t) + U_i(t) + U_g(t), \quad (12.20)$$

$$U_i(t) = K_i(t)\varepsilon_1(t),$$

$$\text{де } U_i(t) = \int_0^t K_u(\tau)\varepsilon_1(\tau)d\tau,$$

$$U_g(t) = K_g(t)\dot{\varepsilon}_1(t),$$

$$\varepsilon_1(t) = q(t) - y(t),$$

$q(t)$  - заданий вплив,  $K_n(t)$ ,  $K_i(t)$  і  $K_g(t)$  – кусочно-постійні коефіцієнти, що визначаються в процесів активної ідентифікації. Задача зведена до вибору корекції кусково-постійних коефіцієнтів рівняння (12.19).

Виконувати корекцію коефіцієнтів  $K_n(t)$ ,  $K_i(t)$  і  $K_g(t)$ , будемо за допомогою спеціальним чином сформованої функції  $\varepsilon_1(t)$ , отриманої в результаті активної ідентифікації об'єкту (12.14), (12.19) по каналу керування.

Розглянемо роботу адаптивної системи у найбільш простому випадку, коли заданий вплив  $q(t)$  представляє собою східчасту функцію:

$$q(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0 \\ q_0 & \text{при } t \geq 0, \end{cases} \quad (12.21)$$

і  $f(t) \equiv 0$  при  $t \geq 0$ .

Синтез такої системи будемо виконувати за допомогою наступних функцій

$$\lambda_1(t) = |\varepsilon_1(t)| - \alpha|\dot{y}(t) - M_0|, \quad (12.22)$$

де  $\varepsilon_1(t)$  – визначається із (12.17),

$\dot{y}(t)$  - визначається із (12.19),

$\alpha > 0$  і  $M_0$  – відносно великі числа,

$$\tau_2 \dot{S}_2(t) + S_2(t) = \tau_2 \frac{d \text{sign} S_1(t)}{dt}, \quad (12.23)$$

де  $\tau_2 > 0$  - достатньо мале число.

Це дає змогу представити рівняння  $U(t)$  у вигляді

$$U(t) = \begin{cases} (U_i(t) = \bar{K}K_n(0)\varepsilon_1(0) & \text{при } \psi'(t) > 0 \\ U_n(t) + U_i(t) + U_g(t) & \text{при } \psi'(t) < 0 \end{cases} \quad (12.24)$$

де  $\bar{K} > 0$  - коефіцієнт,  $\varepsilon_1(t) = q_0$  - значення помилки (12.17).

$$U_n(t) = K_n(t)\varepsilon_1(t),$$

$$U_i(t) = U_i(t_\gamma) + \int_{t_\gamma}^t K_i(\tau)\varepsilon_1(\tau)d\tau, \quad (12.25)$$

при  $t > t_\gamma$   $\psi'(t) < 0, U_g(t) = K_g(t)\dot{\varepsilon}_1(t)$ ,

$$K_n(t) = \begin{cases} K_n(0) & \text{при } \psi'(t) > 0 \\ \frac{\bar{K}K_n(0)\varepsilon_1(0)}{(\dot{y}(t_\gamma))t_\gamma} & \text{при } \psi'(t) < 0 \end{cases}, \quad (12.26)$$

де  $|\dot{y}(t_\gamma)| = \max_{0 \leq t \leq \infty} |\dot{y}(t)|$ , причому  $\psi'(t_\gamma + 0) = -1, \psi'(t_\gamma - 0) = 1$ .

$$K_i(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } \psi'(t) > 0 \\ \frac{\overline{K_u} K_n(t)}{t_\gamma} & \text{при } \psi'(t) < 0 \end{cases}, \quad (12.27)$$

$$K_g(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } \psi'(t) > 0 \\ \frac{\overline{K_g} K_n(t) t_\gamma}{t_\gamma} & \text{при } \psi'(t) < 0 \end{cases}, \quad (12.28)$$

$\overline{K_n}, K_i, K_g$  - позитивні коефіцієнти.

Із аналізу рівняння (12.21) слідує, що процес відпрацювання східчастого заданого впливу  $q(t)$  розподіляється на дві фази. Перша фаза – фаза ідентифікації кусково-постійних параметрів  $K_n(t), K_i(t), K_q(t)$  і має місце при  $\psi'(t) > 0$  або при  $0 \leq t < t_\gamma$ .

Друга фаза – фаза обробки заданого впливу (12.26) при  $\psi'(t) < 0$  або при  $t \geq t_\gamma$ .

На першій фазі управління, як слідує із (12.24), представляє собою східчасту функцію амплітуди  $KK_n(0)\varepsilon_1(0)$ , яка надходить на вхід об'єкта (12.24). Тому при  $0 \leq t < t_\gamma$  таке керування дозволяє оцінити динамічний  $\gamma$  і статистичний  $K_0$  – параметри об'єкту (12.24, 12.25, 12.26).

Такими оцінками є часові параметри  $t_\gamma$ :

$$t_\gamma(t) = \begin{cases} t_\gamma(0) & \text{при } \psi'(t) > 0 \\ \max \psi(t) & \text{при } \psi'(t) < 0 \end{cases}. \quad (12.29)$$

Отже, часові параметри  $t_\gamma(t)$  характеризують величину  $\gamma$  і кусково-постійний коефіцієнт  $K_n(t)$  при  $t \geq t_\gamma$ , які характеризують величину зворотно - пропорційного коефіцієнту  $K_0$ .

Дійсно, в момент  $t=0$ , коли на вхід поступає заданий ступеневий вплив  $q(t)$ , при  $q_0 > M$  функція  $S_1(t)$  (12.23) стає позитивною, тому  $S_2(0)=S(0)=\varphi(0)=\psi(0)=1$ .

В момент  $t=0$  у відповідності з (12.24) формується східчаста функція керування. Функція  $\psi^1(t)$  у відповідності з залежностями:

$$\psi^1(t) = \text{sign} \varphi(t). \quad (12.31)$$

$$\psi(t) = \begin{cases} \int_0^t \psi(\tau) d\tau & \text{при } \psi'(t) > 0 \\ 0 & \text{при } \psi'(t) < 0 \end{cases} \quad (12.32)$$

змінює свій знак в той момент, коли змінює знак оцінка  $y(t)$  похідної модуля  $|\dot{y}(t)|$ .



Авторами [9] доведено, що оцінка  $K_n(t)$  при  $t \geq t_\gamma$  зворотно-пропорційна коефіцієнту  $K_0$  об'єкту (12.17).

Таким чином, якщо при деяких значеннях  $K_0=K_{0н}$  і  $\gamma=\gamma_n$  мало місце оптимального налагодження параметрів  $\overline{K_n}, \overline{K_i}, \overline{K_q}$ , що входять у вираз для  $K_n(t), K_i(t), K_q(t)$ .

Тоді після першої фази ідентифікації в алгоритмі (12.26), (12.27), (12.28) виконуються параметри, які відповідають оптимальному налагодженню ПД-закону керування.

Розроблений принцип керування є законом функціонування адаптивної системи керування з активною ідентифікацією.

В цьому методі керування об'єктами виробництва продуктами здорового харчування спосіб активної ідентифікації дозволяє:

1. Вирішити задачу корекції параметрів лінійного регулятора при одночасній зміні динамічних і статистичних параметрів об'єкту керування;
2. Суттєво покращити в порівнянні з лінійними законами якісні показники перехідних процесів за рахунок активних керованих скачків - впливів при значних помилках регулювання технологічними процесами, коли  $|\alpha_1(t) > M|$ .

### **Контрольні запитання**

1. Яку систему керування називають адаптивною
2. Назвіть основні методи синтезу алгоритмів адаптації.
3. Навести основні характеристики пошукових адаптивних систем
4. Поясніть методи пошукової ідентифікації.
5. Вкажіть сферу використання адаптивних систем зі змінною структурою (СЗС).

## Тема 13. Комбіноване робастне і адаптивне керування виробництвом продуктів харчування

### 13.1. Принципи побудови комбінованих робастних і адаптивних систем автоматизації харчових виробництв

Сьогоднішня теорія робастного керування ( $H_\infty$ -теорія керування,  $H_\infty$ -керування) є однією із інтенсивно розвинутих гілок теорії керування складними технологічними процесами виробництва продуктів харчування [1]. Вона виникла із рішення практичних проблем синтезу багаторівневих лінійних систем керування, що функціонують в умовах різного типу збурень і зміни параметрів складного виробництва продукції.

Починаючи з 90-х років ХХ сторіччя швидко почали розвиватися такі нові напрямки в управлінні як нелінійна і нестационарна  $H_\infty$ -теорія керування, задачі якої розглядаються як задачі теорії гри.

В 80-90 роках ХХ сторіччя найбільш цікавою гілкою для вчених була теорія адаптивного керування. Алгоритми адаптивного керування (прямого і непрямого) для виробництва продуктів харчування були як правило не чутливими до неврахованих зовнішніх і параметричних збурень, причому алгоритми без пошукового самоналагодження ляпуновського типу – особливо чутливими до типу сировини [1,36].

У реальних умовах проєктанти САК повинні вибрати комбінований підхід до керування складним технологічним процесом виробництва продуктів харчування. Одержані успіхи в розробці проблем штучного інтелекту дають можливість синтезувати таке керування. Дійсно, такий підхід дає можливість спроектувати САК процесом виробництва продуктів, яка використовує особливості двох типів керування (адаптивного і робастного) з вибором типу керування на основі методів штучного інтелекту.

Одним із основних понять в теорії робастного керування є поняття невизначеності. Невизначеність об'єкту пов'язана з точністю моделі об'єкту, причому як параметричної, так і структурної. Розглянемо це положення за допомогою простої системи з одним входом і одним виходом і покажемо це на рис.13.1.

Сигнали мають наступну інтерпретацію:  $r$  – заданий вхідний сигнал;  $u$  – вхід об'єкту;  $d$  – зовнішнє збурення;  $y$  – вихідний сигнал (вихід) об'єкту, що вимірюється.

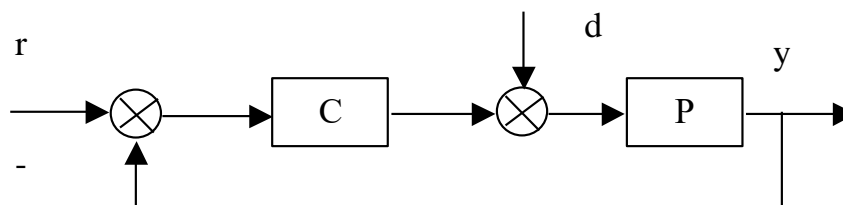


Рисунок 13.1. Система керування з одним входом і одним виходом

У  $H_\infty$ -теорії керування [3] невизначеність можливо задати у частотній зоні. Якщо передавальна функція нормального об'єкту  $W_0$ , а об'єкту збурення  $\bar{W}_{\text{сА}} = (1 + \Delta W)W_0$ . Тут  $W$  – фіксована передавальна функція (вагова функція), а  $\Delta$  – випадкова стійка передавальна функція; задовольняюча нерівності  $\|\Delta\|_\infty \leq 1$ . Тоді таке збурення  $\Delta$  будемо називати допустимим. Наведемо деякі варіанти моделей невизначеності:

$$(1 + \Delta W)W_0; W_0 + \Delta W; \frac{W_0}{1 + \Delta W W_0}; \frac{W_0}{1 + \Delta W}. \quad (13.1)$$

Відповідні припущення ми можемо зробити для величин  $\Delta$  і  $W$  в кожному випадку.

Невизначеність вхідних сигналів  $d$  відбиває різну природу зовнішніх збурень, діючих на об'єкт і регулятор.

Невизначений об'єкт будемо розглядати як деяку множину об'єктів, для якого виберемо деяку характеристику систем зі зворотнім зв'язком, наприклад, стійкість.

Регулятор  $C$  є робастним відносно цієї характеристики, якщо нею володіє кожний із множини об'єктів, що задаються невизначеністю.

Таким чином, поняття робастності розуміє наявність регулятора множини об'єктів і фіксацію визначеної характеристики системи. Для об'єктів виробництва продуктів здорового харчування проведемо дослідження в рамках  $H_\infty$ -теорії керування лише задачу мінімальної чутливості. Тобто необхідно побудувати регулятор  $C$ , який стабілізує замкнену систему і мінімізує вплив зовнішніх збурень на вихід  $y$ , іншими слова, мінімізує  $H_\infty$ -норму матриці передавальних функцій від зовнішніх впливів до виходу  $y$ . У процесі проектування таких систем (регулятора  $C$ ) задаються обмеженнями на вхідні впливи і невизначеність об'єкту у вигляді нерівностей  $\|\Delta\|_\infty \leq 1, \|d\|_2 \leq C_1$ .

Відмітимо, що в процесі функціонування робастної системи інформація про невизначеність не використовується в системі для керування. Такі системи консервативні і мало чутливі, а якість перехідних процесів не задовольняє проєктантів. В цих випадках проєктантам необхідно перейти до іншого способу керування – адаптивного. Частіше всього властивість адаптації досягається за рахунок формування у явному або неявному вигляді математичної моделі об'єкту або вхідного впливу. Цим відрізняється як пошукове адаптивне керування, в основу якого покладений пошук і утримання екстремуму показника якості керування, так і без пошукового керування, в основу якого покладена компенсація відхилення фактичних змін управляючих координат від бажаних змін, які відповідають заданому рівню показника якості.

Таким чином, основна особливість адаптивних систем керування – можливість одержання інформації в процесі функціонування і використання цієї інформації для керування.

Більш того, в адаптивних системах завжди використовуються ап'іорі інформація про невизначеність в системі. Це принципова різниця адаптивного керування від робастного.

Розглянемо типову систему адаптивного керування, яка забезпечує відстеження вхідного сигналу у присутності завад (перешкод) на вході об'єкту (рис.13.2).

Алгоритми побудови такої системи детально описані вище.

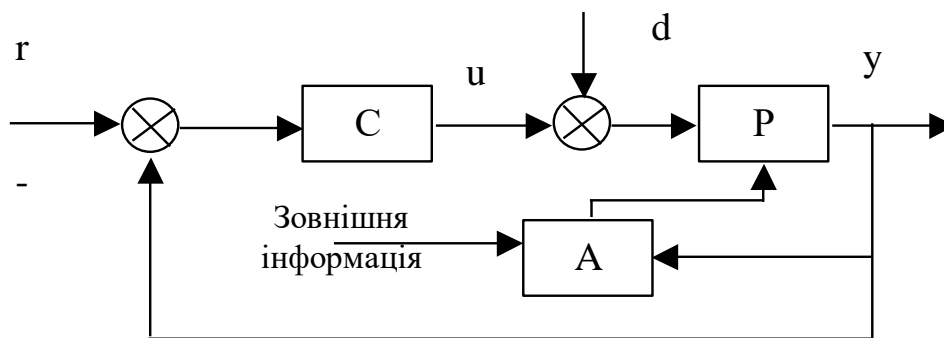


Рисунок.13.2. Адаптивна система керування

В цій системі використовується блок адаптації А, який на основі вихідного сигналу об'єкту і сигналу, що характеризує задану якість перехідного процесу, виробляє сигнал налагодження коефіцієнтів адаптивного регулятора. В системі за допомогою блока адаптації А виробляє деяку інформацію про стан зовнішнього середовища. Наприклад, ми можемо знайти інформацію про  $d$  - зовнішні збурення. Алгоритм керування  $C_a$  відповідає поточному стану зовнішнього середовища відповідно до занесеного в блок адаптації критерію. Але адаптивна система вимагає, щоб вхідний сигнал  $r$  мав широкий діапазон і має жорсткі обмеження на значення і частотний спектр сигналу зовнішнього збурення  $d$ . Тому адаптивні системи можуть працювати лише у вузьких діапазонах вхідного сигналу  $r$  і зовнішнього збурення  $d$ .

Зовні цих діапазонів адаптивна система має низьку якість управління і інколи це приводить до втрати стійкості.

Розглянуті вище якості робастного і адаптивного керування проводять до висновку, що в процесі функціонування системи у одних випадках вигідно використовувати робастне керування, а у інших – адаптивне.

Для умов виробництва продуктів харчування такі випадки пов'язані з одержанням продуктів здорового харчування заданих “портфелем” замовлень якості, тобто залежать від стану зовнішнього середовища, в якому працює харчова-промисловість. Основне питання при проектуванні систем комбінованого керування полягає в тому, яким чином і на основі яких знань (інформації) необхідно виконати вибір того чи іншого типу керування.

Для цього випадку потрібно використовувати методи штучного інтелекту [1,11,13,36].

Їх переваги полягають у використанні широкого спектру даних і знань для формування алгоритму вибору типу керування. Схема комбінованого керування наведена на рис.13.3. Як видно із схеми, сигнал керування і повинен переключатися з робастного регулятора на адаптивний і навпаки – по мірі зміни зовнішнього середовища у процесі функціонування системи.

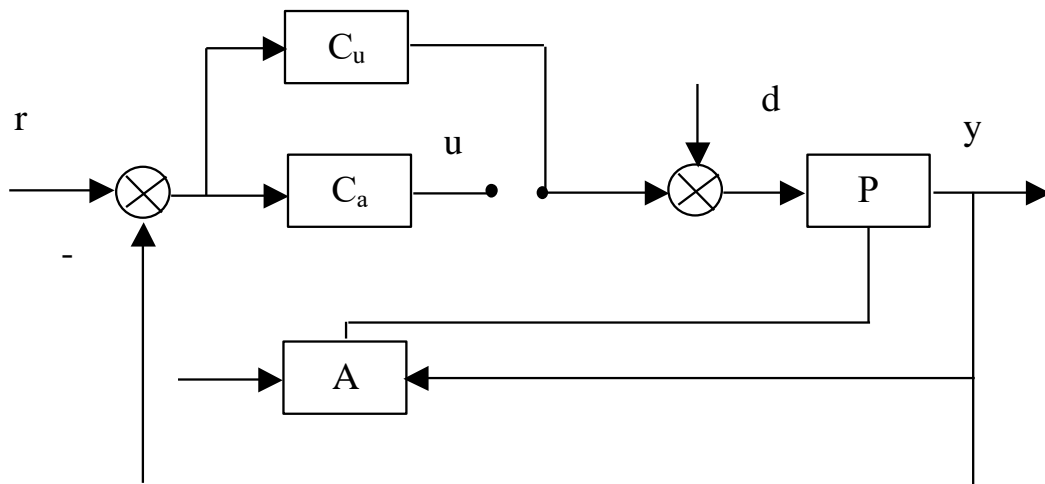
Якщо використати методи теорії інтелектуальних систем, то можливо забезпечити перехід з одного типу керування на інший в залежності від умов

роботи системи.

Розглянемо спочатку, яку інформацію потрібно використати для роботи інтелектуального блоку системи. Відомо, що системи з одним входом і виходом гарно описують у частотній зоні. Тому природно використати частотні характеристики для організації процесу прийняття рішень при виборі типу керування.

Як було показано вище, частотна характеристика системи з робастним керування відповідає найгіршому поєднанню параметрів у зоні невизначеності.

Тому робастне керування можливо приймати за одну із меж вибраного керування. Інша межа визначається можливостями досліджуваної системи (типи сипровини, що надходять на виробництво продуктів харчування, тип обладнання, електроприводу, продуктивність стадій, рециклів тощо). Між цими двома межами знаходиться зона, де розумно використовувати адаптивне керування.



**Рисунок 13.3.Схема комбінованого керування**

На першому етапі функціонування системи потрібно використовувати робастне керування, яке нечутливе до швидкості зміни зовнішньої перешкоди (завади). Але в цьому випадку виникає велика тривалість перехідних процесів і значно більші величини допустимих значень вихідної координати при дії перешкоди.

Після деякого часу роботи системи робастне керування необхідно переключити на адаптивне. Адаптивне керування дозволяє більш точно відстежувати вхідний сигнал при наявності інформації про перешкоди.

Адаптивне керування вимогливе до широти спектра вхідного сигналу і, коли, наприклад, сигнал завади змінюється монотонно (дуже повільно), то можливі зриви процесів адаптації або їх уповільнення. В цій ситуації необхідно знову переходити на робастне керування, що гарантує стійкість роботи системи.

Із вище сказаного слідує наступний висновок:

- для функціонування систем необхідно мати інформацію про частотний спектр потрібного сигналу завади і про відношення сигнал/завада;

- потрібна попередня інформація про частотні спектри, на яких працює адаптивна система, а також про частотні характеристики об'єктів управління на межі зони невизначеності. З цієї інформації потрібно сформувати базу даних, в яку інформація, що індивідуальна для кожного класу об'єктів, заноситься раніше;

- інформація про частотний спектр корисного сигналу, завад і про відношення сигнал/завада поступає в базу даних (БД) по мірі функціонування системи і постійно оновлюється;

- складову базу даних можемо використовувати для побудови бази знань (БЗ), яка формується у вигляді наступних правил:

- в залежності від конкретних якостей системи можливо встановити переключення двох типів управління. Потрібні правила формуються у одній із логічних систем, які розроблені для умов виробництва продуктів здорового харчування і будуть розглянуті детальніше в інших розділах підручника..

Отже, маючи базу даних і базу знань, ми можемо розробити механізм прийняття рішень щодо вибору типу керування в залежності від умов функціонування системи.

### ***Контрольні запитання***

- 1. З якою метою проєктанти використовують комбіновані адаптивні системи в автоматизованому керуванні технологічних процесів виробництва продуктів харчування?*
- 2. В чому полягає основне питання при проєктуванні систем комбінованого керування?.*
- 3. В якій ситуації необхідно переходити на робастне керування, що гарантує стійкість роботи системи?*
- 4. Чому адаптивне керування залежить від спектра вхідного сигналу.*
- 5. Чому поняття невизначеності є одним із основних понять в теорії робастного керування ?*

## **ЧАСТИНА 3.**

### **РОБОТОТЕХНОЛОГІЧНА АВТОМАТИКА**

#### **Тема 14. Робототехнологічні комплекси та робототехнічні пристрої в АСУТП підприємств харчової промисловості**

##### **14.1. Основи робототехніки**

Роботи та робототехнологічні системи знаходять широке використання в харчовій та сільськогосподарській промисловості. Роботизація та автоматизація рутинних видів розумової праці людини з використанням роботів - головний фактор підвищення продуктивності праці в харчовій промисловості та проектування робототизованих комплексів з виробництва смарт- продуктів для України та країн ЄС.

Робототехнологічні комплекси - багато технологічні, автоматично діючі, перепрограмовані роботи, вбудовані в технологічний процес, спроектовані на принципах синергетичної інтеграції елементів різної фізичної природи та призначені для перетворення енергії, матеріалів, інформації з метою створення керованих функціональних рухів його вихідних ланок направлених на підвищення якості продукції та зниження енергетичних затрат [28,30,32,35].

Промисловий робот - робот призначений для виконання технологічних операцій I /(АБО) допоміжних операцій в харчовій та сільськогосподарській промисловості. Технологічний промисловий робот- промисловий робот для виконання технологічних операцій, процесів, оснащений робочим та вимірювальним інструментом. Допоміжний промисловий робот – промисловий робот для обслуговування технологічного обладнання, переміщення об'єктів, який оснащений пристроєм захоплення.

Спеціальний робот - робот для виконання однієї операції одного виду. Спеціалізований робот - робот для виконання різних операцій одного виду. Універсальний робот - робот для виконання різних операцій різних видів. Жорсткопрограмований робот - робот, керована програмна система якого, введена на етапі програмування, не може бути змінена в процесі роботи в залежності від функціонування робота I /(АБО) контрольованих параметрів робочого середовища.

Адаптивний робот - робот, управлінська програма якого може автоматично змінюватись в процесі роботи в залежності від функціонування робота I /(АБО) контрольованих параметрів робочого середовища. В харчовій промисловості знаходять використання роботи з «очувленням», в яких датчики зовнішньої інформації ( відеокамери) дозволяють без зміни програм керування виконувати технологічні операції виробництва смарт-продукції. Інтелектуальний робот - робот, програма керування якого може повністю або частково формуватись автоматично у відповідності з поставленим завданням і в залежності від стану робочого середовища.

Маніпуляційний робот - робот для виконання функцій руху, аналогічним

функціям руки людини. Стаціонарний маніпуляційний робот, закріплений на нерухомій основі. Мобільний робот-робот який рухається в робочому середовищі у відповідності з програмою керування. Він може бути забезпечений маніпулятором. До мобільних роботів не відносять пересувні маніпуляційні роботи, які можливо оперативно переміщувати в робочому середовищі в ручному режимі або за рахунок транспортних засобів з ручним керуванням.

Робототехнологічний пристрій вбудований в технологічну лінію виробництва продуктів харчування – інтелектуальний робот, побудований за принципами мехатронних і інформаційних технологій, ефективно виконуючий програмні, функціональні рухи вихідного механізму в умовах зміни параметрів сировини і зовнішнього середовища та призначений для виконання енергетичних, технологічних, транспортних, інформаційних перетворень з метою заміни фізичної праці людини – оператора, підвищення його розумової активності; з метою траекторного управління виробництвом продукції здорового харчування для населення, яке мешкає на забруднених територіях.

Робототехнічні системи знайшли широкий вжиток в харчовій промисловості, особливо в технологіях безлюдного виробництва дитячого харчування та в системах упакування – завантаження - розвантаження продукції. Роботи мають значну функціональну гнучкість за рахунок: прогресивних виконавчих механізмів, ефективних приводів, мікропроцесорних управлінських систем з розвиненим програмним забезпеченням, технічного зору і інших засобів візуалізації, адаптивних систем, елементів штучного інтелекту.

Поняття робототехніки (Р) витікає із наведеної на рисунку 14.1 системи: виробництво - менеджмент – вимоги ринку; механіки - електроніки - комп'ютерної техніки. Ці атрибути і дали змогу вченим створити сферу науки і техніки, яка основана на синергетичному Р – об'єднанні механічних, електричних, електронних і комп'ютерних компонентів, які забезпечують проєктування безлюдних технологій в харчовій промисловості.



**Рисунок 14.1. – Синергетичне Р-об'єднання механічних, електричних, електронних і комп'ютерних компонентів**



В монографії [1] наведено узагальнену блок-схему робототехнологічного комплексу виробництва продуктів харчування. Таку систему будемо в подальшому називати робототехнологічним комплексом, який складається із декількох робототехнічних пристроїв, взаємодіючих із сировиною та інгредієнтами з метою створення гетерогенного середовища зі заданими властивостями продукції.

Перспективним напрямком щодо проектування робототизованих виробництв є подальший розвиток комбінованих технологій: гібридних технологій електромеханіки та мехатроніки, цифрових адаптивних систем (інтелектуальних роботів) з керованими впливами на сировину, гетерогенне середовище у вигляді вбудованих робототехнічних інтенсифікаторів та робототехнічних комплексів виробництва смарт-продукції.. Від механічної кавітації до ультразвукової така тенденція розвитку робототехнічних інтенсифікаторів з інтелектуальними системами керування складними процесами диспергування, наприклад м'ясних продуктів або печінки в тісто при виготовленні макаронних виробів чи спеціального харчування для воїнів ЗСУ. З використанням автоматизованого проектування та CALS- технологій, авторами монографії розроблені новітні робототехнічні комплекси для умов харчової промисловості, в яких в якості вбудованих систем використані робототехнічні інтенсифікатори з ультразвуковими кавітаційними впливами на гетерогенне середовище( наприклад, опара-тісто).

Перейдемо до класифікації робототехнологічних систем і наведемо приклади їх використання в харчовій промисловості, враховуючи парадигму наукового напрямку - впровадження безлюдних технологій у виробництво смарт-продукції харчування для регіонів з техногенним тиском.

Отже, роботи будемо розділяти:

1. За характером виконавчих операцій: робототехнологічні системи призначені для перетворення сировини, тобто надання їй нових властивостей з метою одержання інноваційної продукції здорового харчування; транспортні - призначені для переміщення сировини, очищення сировини у тому числі і води від забруднень та важких металів ( допоміжні роботи в системі підготовки, зберігання сировини її транспортування та оцінки якості); інформаційні - призначені для одержання та перетворення інформації (інформаційні технічні роботи), з властивостями одержувати інформацію в дільницях виробничого процесу не доступного для візуального спостереження оператором в камерах технологічних апаратів та стан навколишнього середовища (температура, волога, концентрація важких металів, концентрація пилу, рН-води тощо).

2. По функціональному призначенню: маніпуляційні, мобільні, інформаційні.

3. За сферами використання: промислові, непромислові.

4. За точністю руху вихідної ланки: мала - помилка позиціонування від 1мм і вище, середня- помилка позиціонування від 0,1мм до 1мм, висока - помилка позиціонування від 0,01 до 0,1, надвисока - помилка позиціонування нижче 0,01мм.

5. За місцем розміщення центра керування рухом або впливом на процес: з власним наведенням, зі зовнішнім наведенням.

6. За типом каналів зв'язку з центром зовнішнього керування: дротяний, радіоканал, інфрачервоний, ультразвуковий.

7. За типом системи керування: керування оператором (дистанційно або безпосередньо), системи з програмним керуванням, супервізорне керування, комбіновані системи дистанційно-автоматичного керування. В свою чергу в залежності від функціонального призначення робото технічні системи будемо розділяти на три великі класи: маніпуляційні робото технічні системи; мобільні робото технічні системи; інформаційні та управлінські робото технічні системи, Серед маніпуляційних систем виокремимо - клас автоматично діючих роботів, автоматичних маніпуляторів та роботизованих технологічних комплексів.

Автоматично діючі роботи теж розділяють на чотири класи: жорстко вбудовані, програмні, адаптивні, інтелектуальні. До жорстко вбудованих роботів будемо відносити механічні руки, жорстко зв'язані з технологічним обладнанням і виконуючі операції у відповідності з раніш розробленою програмою без залежності від зміни умов зовнішнього середовища. До таких роботів віднесимо: захист сировини від забруднення тяжким металом, відбору опари- тіста для оцінки густини, запаху, рН- параметрів[1]

В матеріалах американського посібника[9] автори теж значну увагу приділили проєктним рішенням адаптивних роботів з адаптивними регуляторами, які можуть самостійно орієнтуватись у навколишньому середовищі та пристосуватись до нього. В них є вбудовані сенсори та системи візуалізації, які реагують на зміни навколишнього середовища [9,23].

В монографії [1] роботи за допомогою ультразвукових інтенсифікаторів взаємодіють з сировиною та гетерогенним середовищем, різними інгредієнтами та додатками,

Інтенсифікацію виробничих процесів за допомогою робототехнологічних комплексів при збереженні високої якості продукції, а саме направлено впливу імпульсних ультразвукових коливань на сукупність хімічних, фізико-хімічних. теплових, дифузійних і біохімічних процесів, які виникають при взаємодії з продуктом виробництва, моніторинг в реальному масштабі часу органолептичних, фізико-хімічних показників за допомогою інтелектуальних систем контролю, автоматизоване мікропроцесорне керування процесом виробництва продукції на всіх стадіях будемо називати безлюдним роботизованим виробництвом смарт-продукції харчування.

Таке виробництво включає також робототехнічні комплекси (РТК).

До робототехнічних комплексів будемо відносити будь-яку систему машин і апаратів, які працюють з людиною І/АБО без нього, який включає лише один робот з функціями без яких система не забезпечує встановлених показників якості її роботи.

Роботизований технологічний комплекс- це сукупність засобів технологічного оснащення (ЗТО), які утворюють взаємозв'язану систему, включаючи промислові роботи і призначені для автоматичного виконання однієї або декількох операцій виробничого процесу завантаження готової

продукції.

Основні характеристики якості РТК:

-продуктивність, гнучкість та її вид, ефективність; показники надійності, склад технологічних операцій їх показники якості; час переходу на новий вид виробів, показники ступенів готовності продукції;

-експлуатаційні показники (час роботи без участі людини, чисельність персоналу, площа, яку займає робототехніка, час регламентованого простою (коефіцієнт технічного використання), вимоги до кваліфікації операторів і персоналу для виконання регламентних робіт);

-питомні затрати матеріальних, енергетичних і трудових ресурсів;

-ергономічні показники; естетичні показники;

- ступінь конкурентоспроможності, ступінь стандартизації та уніфікації;

-патентно-правові показники (ступінь патентного захисту технічних рішень);

-екологічні показники; показники безпеки для персоналу.

## 14.2. Характеристики промислових робіт

Розпочнемо вивчення цього питання з аналізу геометричних характеристик робіт та мехатронних пристроїв.

До геометричних характеристик промислових робіт відносять: робочий простір, робочу зону, зону обслуговування, досягненність, маневреність, маніпулятивність, об'єм руху.

**Робочий простір**- множина точок, з якими може співпадати хоч би одна точка виконавчого пристрою промислового робота.

**Робоча зона**- підмножина точок робочого простору, з якими може співпадати кінцева точка виконавчого пристрою при його функціонуванні.

**Зона обслуговування**- частина робочої зони, в якій робочий орган виконавчого пристрою виконує задані функції.

**Досягненність**- можливість робочого органу виконувати програму промисловим роботом попадати в задану найбільш віддалену від початку базової системи координат (БСК) точку С

$$[D] = (X^2 + Y^2 + Z^2)^{1/2} \quad (14.1)$$

де X, Y, Z-координати точки С.

**Маневреність**- можливість груп ланок виконавчого механізму промислового робота обертатись навколо однієї або декількох вісь, які проходять через центри сферичних кінематичних пар при фіксованому положенні робочого органу і заданому напрямку його підходу до обраної точки зони обслуговування.

**Маніпулятивність**- можливість виконавчого пристрою промислового робота орієнтувати робочий орган необхідним чином в заданих точках робочої зони. Перейдемо до аналізу точності характеристик, саме:

**Похибка позиціонування**- відхилення положення характеристичної робочої точки С робочого органу виконавчого механізму промислового робота від значення, яке задається керуючою програмою.

**Чутливість**- можливість робочого органу виконавчого пристрою промислового робота відхилитись від заданого положення при змінні узагальненних координат на малу величину  $g_i$ .

**Номінальна вантажопідйомність**  $m_n$  (кг)- найбільше значення маси  $m$  об'єкту вкупі з масою захоплюючого пристрою  $m_i$ . при якому гарантується захоплення, утримання і забезпечення установлених значень експлуатаційних характеристик промислового робота

$$m_n = m + m_i$$

**Силові приводи роботів** Приводи промислових роботів включають: двигун, пристрій керування, перетворювач, інформаційний пристрій та комунікації, які необхідні для передачі енергії до приводів і для передачі сигналів керування та зворотного зв'язку. В залежності від використання виду енергії приводи розділюють на пневматичні, гідравлічні, електромеханічні та комбіновані.

**Виконавчі пристрої промислових роботів** у загальному вигляді представляє собою важильний механізм з багатоланковим кінематичним ланцюгом. До складу виконавчих пристроїв входять рівнозважувальні системи, які покращують енергетичні характеристики системи керування виконавчих механізмів.

Якщо виконавчий механізм виконано у вигляді руки, то важкопідйомність руки промислового робота- найбільша маса об'єктів маніпулювання(включаючи масу захоплюючого пристрою), які можуть переміщуватися рукою за заданими умовами( при максимальній швидкості,максимальному вильоті руки і т.п.).

Для деяких типів промислових роботів важливим показником є зусилля(або крутний момент), що розвивається виконавчим механізмом за заданими умовами. До таких показників можна віднести умову затиску (захвата, втримання) об'єкта маніпулювання захоплю вальним пристроєм, робоче зусилля руки промислового робота уздовж її повздовжньої осі; крутний момент при ротації захоплю вального пристрою. Число ступенів рухомості промислових роботів- сума можливих координатних рухів об'єкта маніпулювання відносно опорної системи( стойки,основи) промислового робота. Похибка позиціювання- відхилення заданої позиції виконавчого механізму від фактичної при багаторазовому позицію ванні (повторенні рухи). Похибку позиціювання можна оцінювати в лінійних або кутових одиницях.

**Захоплювальні пристрої промислових роботів** Захоплювальні пристрої промислових роботів та маніпуляторів служать для захоплення і втримання у визначеному положенні об'єктів маніпулювання. Ці об'єкти можуть мати різні розміри, форму, масу і володіти різними фізичними властивостями, а тому захоплюючі пристрої відносять до числа змінних елементів промислових роботів. В системах керування процесом захоплення важливу роль відіграють датчики. Перейдемо до вивчення цього важливого питання.

### **14.3. Датчики в системах розпізнавання та технічного зору роботів і мехатронних пристроїв**

Досвід використання робототехнологічних комплексів в харчовій промисловості показує, що суттєве розширення їх функціональних можливостей та підвищення продуктивності може буде досягнуте за рахунок подальшого інтенсивного розвитку сенсорних пристроїв і підвищення рівня інтелектуалізації систем. Сучасні засоби очуствлення дозволяють використовувати для керування цими системами різні потоки спостереження (зору), тактильної, звукової, мовної та іншої інформації. Візуальна інформація сприймається та обробляється за допомогою систем, які будемо називати технічним зором. Вони можуть діяти в оптичному, ультразвуковому та радіохвильовому діапазонах. Створені також системи аналізу візуальної інформації, які діють на основі проникнення гама сигналів, рентгенівських випромінювань тощо. Цікавими для мехатроніки є також тактильні аналізатори візуальної інформації, які дозволяють за допомогою технології «дотиків» одержувати інформацію про форму об'єкта досліджень. Оснащення мехатронних пристроїв засобами аналізу візуальної інформації дозволяє одержувати та обробляти загальну картину інформації про поточний стан технологічного процесу, про поточний стан розташування виконавчих механізмів робота та об'єктів маніпулювання; виконувати локацію робочого простору, розпізнавання об'єктів, вимірювання статичних та динамічних робочих характеристик робототехнологічного обладнання. вбудованих в технологічний процес роботів-інтенсифікаторів і т.п. Необхідно також відзначити, що використання засобів аналізу інформації від спостереження за об'єктом в системах автоматичної візуалізації контролю його стану дозволяє виконувати більшість операцій в реальному масштабі часу з високою точністю і надійністю, що значно перевищує можливості людини-оператора. Потенційні можливості автоматичних систем візуалізації безмежні, а відповідно використання в харчовій промисловості систем машиного зору найбільш перспективне в системах виробництва продукції здорового харчування, наприклад в системах контролю якості сировини, продукції відходів тощо.

У сфері автоматичного оброблення візуальної інформації в оптичному діапазоні в сучасний момент досягнуто значних успіхів, а переваги технічного зору в робототехнологічних комплексах дозволили впроваджувати в галузі безлюдні технології виробництва продуктів здорового харчування для дітей та школярів. Потреба автоматично візуально контролювати зовнішнє середовище щодо мінімізації викидів CO<sub>2</sub> привело до використання відповідних аналізаторів, які мають значну швидкодію і можливість контролювати об'єкти харчової індустрії з складними виробничими структурами. Для задоволення цих вимог відповідні системи технічного зору повинні обробляти напів тіньові зображення і виконувати різні функції необхідні для ідентифікації зображення. Приклади подібних систем технічного зору розглянемо в цьому навчальному посібнику в процесі розробки робототехнологічних інтелектуальних комплексів заморожування м'ясних продуктів. Деякі задачі мехатроніки в харчовій промисловості, наприклад автоматична підготовка тушки птиці, вимагає

фізичного контакту між об'єктом (або навколишнім середовищем) і пристроєм захоплення робота. Оскільки наявність такого контакту є необхідною умовою успішних проектних рішень, то виникає бажання використовувати його одночасно і для розпізнавання об'єкта, з яким взаємодіє робот, для оцінки його параметрів таких як: геометричні розміри, орієнтація в просторі, ступінь нерівності поверхні напівфабрикату заготовки (хліба, котлет, птиці) тощо. Такі датчики будемо називати тактильними системами, які мають засоби штучного сприйняття і мають високу швидкість оброблення інформації в реальному масштабі часу. Базовий елемент тактильного датчика - сенсор з тактильною чутливістю, або таксел (тактильний піксел). Він перетворює механічний тиск в сигнал.

Дотичність роботів забезпечується різними типами датчиків (мікровиключателі, датчики сили тощо) від найпростіших контактних до тактильних двовимірних. Основу тактильних датчиків складають шари гуми, яка прведе струм. Інколи її називають штучною шкірою, якою накривають виконавчі органи робота. По бокам шару розташовані електроди, з яких знімають сигнали, котрі залежать від зміни електричного опору під впливом локальних механічних зусиль, діючих на шар провідної гуми. Особливістю таких датчиків є їх механічна гнучкість, мала вартість, а також лінійна залежність електричного опору від деформації, а відповідно і від локального навантаження. Основними матеріалами для виготовлення штучної шкіри слугують: каучук, полібутадієн, полізопрен та інші м'які речовини, які змішанні з частинками провідних матеріалів (порошка графіту, вугілля, мінеральної пудри тощо). [32] До недоліків цих матеріалів необхідно віднести: нелінійність відгуку, гістерезис, наявність шумів, у процесі вимірювання, старіння, втома. У той же час відмітимо, що погіршення властивостей датчиків проходить відносно повільно, а тому різка зміна характеристик малоймовірна. Це дозволяє вважати, що у процесі захоплення об'єкту датчик має високу надійність. До тактильних датчиків з різними технічними характеристиками віднесимо:

1-матричні тактильні датчики; 2- оптичні тактильні датчики; 3- ультразвукові тактильні датчики. Розглянемо більш детально принцип дії деяких із них. Розпочнемо цей аналіз з датчиків тиску.

**Масиви датчиків тиску.** Вони є великими сітками волокон. Волокна є «волоконним елементом» Кожне волокно здатне виявляти нормальні сили.

Волоконний датчик забезпечує високу роздільну здатність «зображення» контактної поверхні. Поряд з просторовою роздільною здатністю і чутливості сили, системно-інтеграційні питання такі як провідники і сили маршрутизації мають важливе значення. Масиви датчиків тиску доступні у вигляді тонких плівок. Приклади таких датчиків масиви, побудовані з електропровідної гуми, циркон ата-титанату свинцю (PZT), полівініліденфторид (PVDF), PVDF-T2FE, FET і чутливі ємнісні елементи.

**Тензометрична розетка.** Це система датчиків, які виготовлені із декількох Тензометр, кожен з яких дозволяє виявити силу в певному напрямку. Після об'єднання інформації від тензодатчиків, можна визначити характери сил

і моментів.

**Біологічно основані датчики дотику.** Ця система датчиків, яка об'єднує датчики сили, датчики вібрації і розпізнавання теплопередачі.

**DIY та Відкрито-Апаратні датчики дотику.** Цей тип тактильних датчиків дотику дозволяє одержувати інформацію, що отримується від фізичної взаємодії виконавчих механізмів робота або мехатронного прострою з навколишнім середовищем. Датчик дотику, як правило проектується за зразком біологічного відчуття дотику шкіри, який здатний виявити подразники в результаті механічного подразнення або зміни температури.

Тактильні датчики широко представлені в системах керування електромеханічними пристроями роботів, а отже перейдемо до вивчення принципу дії електроприводу.

#### **14.4. Електропривід роботів та мехатронних систем**

**Електропривід** - це електромеханічна система для надання руху із заданими параметрами виконавчим механізмом робота в цілях здійснення їх функцій. У відповідності з стандартами України (ДСТУ2313-93 Електроприводи. Терміни та визначення, ДСТУ60204-1 Безпечність машин, електрообладнання машин. Загальні вимоги) сучасний електропривід - це сукупність електродвигуна, який є джерелом механічної енергії, апаратури керування і захисту, а також механічної, гідравлічної або електричної передачі. Електроприводи роботів є основними споживачами електричної енергії (до 60%) і головним джерелом механічної енергії в робототехнологічних системах. Вибір типу привода залежить від функціонального призначення робота. Основними факторами, які визначають вибір типу привода є:

- призначення та умови експлуатації робота, вантажопідємність і необхідні динамічні характеристики конструкції, вид систем керування.

У подальшому будемо розглядати лише електромеханічні приводи. Електромеханічний привід робота складається із електродвигуна, механічного перетворювача, який включає власне перетворювач руху (передачі), механізмів зменшення мертвого ходу, гальмівні пристрої, направляючі, інформаційні пристрої, муфти та системи керування. Отже, електродвигун - це орган перетворення електричної енергії в механічну. В електричних приводах роботів використовують електродвигуни постійного струму, синхронні, асинхронні, лінійні та крокові. В більшості використовують двигуни постійного струму. Механічний перетворювач- пристрій, який перетворює параметри руху електродвигуна в необхідні параметри руху вихідної ланки привода.

До складу механічного перетворювача віднесені: перетворювач руху (передача) - механізм, який призначено для перетворення одного виду руху в інший, узгодження швидкості і обертальних моментів електродвигуна і вихідної ланки привода. Механізм зменшення мертвого ходу (люфтозменшувальний механізм) - пристрій, який призначений для зменшення проміжку в деяких ланках перетворювача руху.

Гальмівні пристрої - пристрої, які призначені для зменшення швидкості. зупинки та утримання у заданному положенні вихідної ланки привода.

Направляючі - пристрої, які забезпечують заданий відносний рух елементів привода.

Інформаційні пристрої - пристрій, який перетворює контролюєму величину в сигнал, зручний для вимірювання, передачі, перетворення. збереження і реєстрації, а також для впливу ним на керовані процеси. Датчики інформації (датчики переміщення та швидкості) призначені щодо визначення переміщення і швидкості вихідної ланки привода.

Муфта - пристрій для з'єднання вала двигуна з перетворювачем руху, а також для захисту двигуна від перенавантажень.

Пристрій керування - пристрій для формування і надання управлінських впливів електродвигуну у відповідності з програмою керування.

До основних якісних ознак електроприводу віднесемо: широкий діапазон регулювання, безшумність, відсутність трубопроводів, простота монтажу та налагодження, надійність.

Основним недоліком електромеханічного привода є низький показник питомої потужності (відношення потужності електродвигуна до його маси), тому що електрод вони великі за розміром і масою.

Електромеханічний привід розраховують з врахуванням наступних чинників: динамічних властивостей в процесі запуску гальмування та зміни навантаження; діапазона регулювання швидкості, виду механічної характеристики; режиму роботи в часі підтримання заданого режиму, частоти включення привідного механізму.

#### **14.5. Теорія та практика мехатронічних систем керування складними технологічними процесами виробництва продуктів здорового харчування**

**Мехатроніка** - сфера науки та техніки, яка оснований на синергетичному об'єднанні механічних, електротехнічних, електронних і комп'ютерних компонентів, яка забезпечує проектування і виробництво якісно нових пристроїв з інтелектуальним керуванням їх функціональними рухами. Створенні при цьому установки будемо називати мехатроніками. Термін «мехатроніка» вперше з'явився в Японії у 1969 році. Його ввів Тецуро Морі, співробітників компанії Yaskawa Electric. Термін «мехатроніка» складається із двох частин - «меха» перша частина слова механіка та «троніка» від слова електроніка.

У багатьох сферах техніки мехатронічні системи знайшли широке використання - вони прийшли на зміну «механічним» машинам, які на сучасному етапі розвитку обладнання для виробництва продуктів здорового харчування уже не відповідають якісним вимогам до сучасного обладнання. Тому при проектуванні сучасних безлюдних технологій виробництва продуктів здорового харчування необхідно використовувати мехатронічний підхід а саме: перенести функціональні навантаження від механічних компонентів до інтелектуальних (електронних, комп'ютерних та інформаційних).

Отже, лише сучасна тенденція розвитку обладнання для безлюдних



технологій виробництва харчів «від механіки до інтелектуальної мехатроніки» може забезпечити виробництво продукції здорового харчування для населення, яке мешкає і працює на забруднених територіях Придніпровського регіону. Тенденція переходу від механіки до мехатроніки стимулює інтеграцію **механічних компонентів з інтелектуальними в межах єдиної мехатронної виробничої системи.**[24, 28,35,37]

У мехатронних пристроях умовно виокремлюють три головні частини-механічну,електронну та інформаційну, сукупність яких і утворює в цілому систему керування технологічним процесом виробництва продукції. Розвиток машин, апаратів, обладнання з механічним виробництвом продукції до мехатронних систем відбувся у три етапи:

1. Розвиток системи з електроприводом та механічними перетворювачами руху з електронними блоками;
2. Розвиток системи з адаптивною корекцією рухів виконавчих механізмів на базі мікропроцесорних систем керування;
3. Інтелектуальні системи керування з вбудованими датчиками інформації з інтерфейсами людина – робот з комп'ютерними системами багаторівневого керування (мехатронні системи) виробництвом продуктів здорового харчування.

Особливий інтерес щодо розвитку мехатроніки представляють комбіновані технології: гібридні технології електромеханіки та мехатроніки, цифрові технології керування виробництвом продукції, технології автоматизованого проектування керованими апаратами та CALS- технології, алгоритми з програмним забезпеченням інтелектуального управління, які дозволяють розробляти надсучасні мехатронні технологічні апарати та системи керування. Важливим елементом таких систем є робототехнологічний мехатронний пристрій. Деякі вчені вважають, що це - багатофункціональний, автоматично діючий перепрограмований робототехнологічний комплекс, який побудовано на принципах синергетичної інтеграції елементів різної фізичної природи та призначений для перетворення енергії, матеріалів, інформації і виконання управлінських функціональних рухів його вихідних ланок.

У процесі вивчення цієї навчальної теми виокремимо наступні робототехнічні мехатронні пристрої:

- робото технічні мехатронні апарати;
- робототехнічні мехатронні системи;
- робототехнічні мехатронні комплекси.

Важливо відмітити, що основними елементами будь-якого робото-технічного мехатронного пристрою є мехатронні модулі. Мехатронний модуль - функціонально і конструктивно самостійні вироби з використанням програмного забезпечення(ПЗ)та енергетичної апаратно програмної інтеграції складових: технології, сировини,енергії.інформації.програми виготовлення продукції та призначене для реалізації необхідного управлінського функціонального руху його виконавчих ланок.

Тобто мехатронні модулі представляють собою «цеглу» із якої будемо проектувати робототехнологічні комплекси для харчової промисловості.

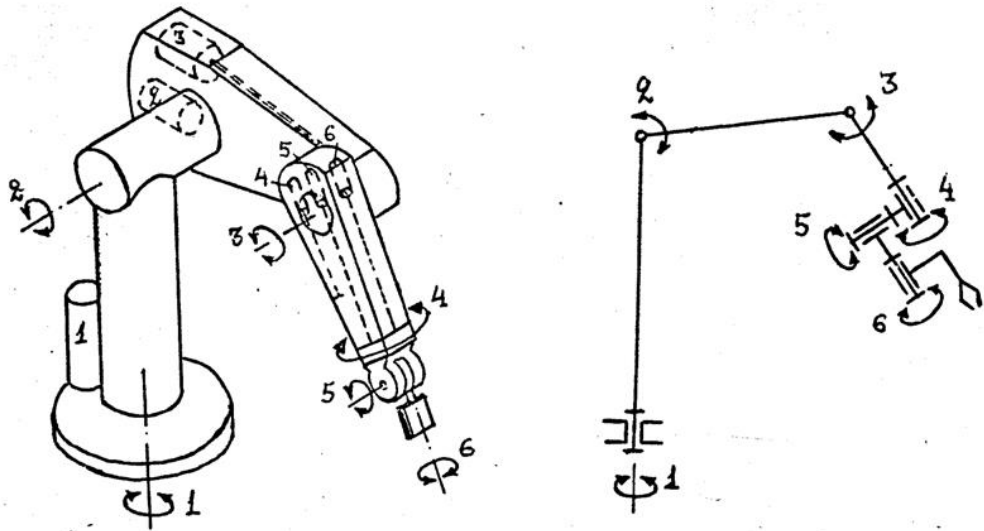
Слово робот вперше використано чеським письменником Карел Чапеком в книзі «Універсальні роботи Расума». В цій книзі він пише про механічних слуг, які виконують різні роботи. На чеському слово «робот» означає робітник.

З розвитком нових технологій, кібернетики, синергетики, штучного інтелекту, комп'ютерних систем з'явилась нова наука- мехатроніка. а отже відповідно робото технічні мехатронні системи. Це інтелектуальний робототехнічний мехатронний пристрій, побудований на мехатронних принципах і технологіях, який ефективно виконує програмні функціональні рухи вихідної ланки у змінних умовах зовнішнього середовища та прзначений для виконання енергетичних, технологічних, транспортних і інформаційних перетворень з метою заміни фізичної та розумової праці людини. Здобувачі вищої освіти зможуть також самостійно ознайомитись з джерелами [9,23,24, 28,30,32, 36, 37 ], в яких детально наведені принципи проектування роботів і робототехнологічних комплексів в промисловості.

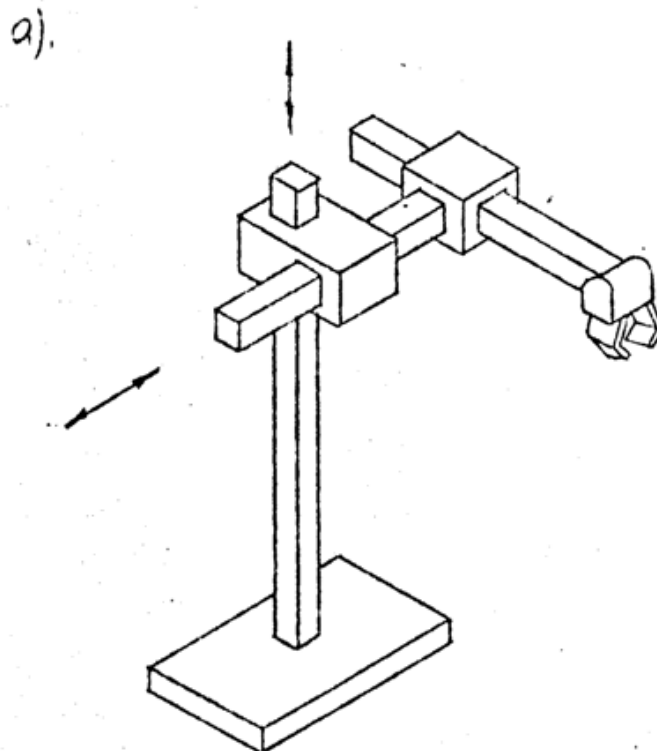
Перші інтелектуальні роботи почали проектувати американські вчені в Стенфорському науково-дослідному інституті. В 1969 році був розроблений макет рухливого робота « ШЕЙКИ» з розвиненою системою сенсорного забезпечення. Воно включає технічний зір, штучний інтелект, що дозволяло роботу рухатись у невідомих обставинах. самостійно приймати необхідні для цього рішення.

В 1971 році в Японії був спроектований експериментальний робот з технічним зором і елементами штучного інтелекту «ХІВІН», який міг самостійно виконувати механічне збирання простих об'єктів на основі наданих креслень. Розглянемо деякі конструкції роботів з елементами штучного інтелекту та сенсорикою. Серед них: Робот Пума фірми Юнімейшен, загальний вигляд маніпулятора якого представлено на рис.14.2(a) та його кінематичну схему рис.14.2б

На рис.14. 3 наведено схему маніпулятора з прямокутною системою координат. Такий маніпулятор має лише три ступені свободи і його можливо використовувати як мехатронний пристрій в системі виконання завантажувально-розвантажувальних робіт. На рис.14. 4. наведено мехатронну систему для збирання огірків та помідорів. Мехатронна система рухається впродовж теплиці по технологічному трубопроводу та має маніпулятор зі спеціальним захоплювальним пристроєм та системою технічного зору.



**Рисунок 14.2. Робот Пума з маніпулятором (а) та кінематичною схемою(б). У цьому роботі використано наступне обладнання: 1,3- двигун приводів першого та другого ступенів рухомості, маніпулятор-4 з системою керування та технічного зору.**

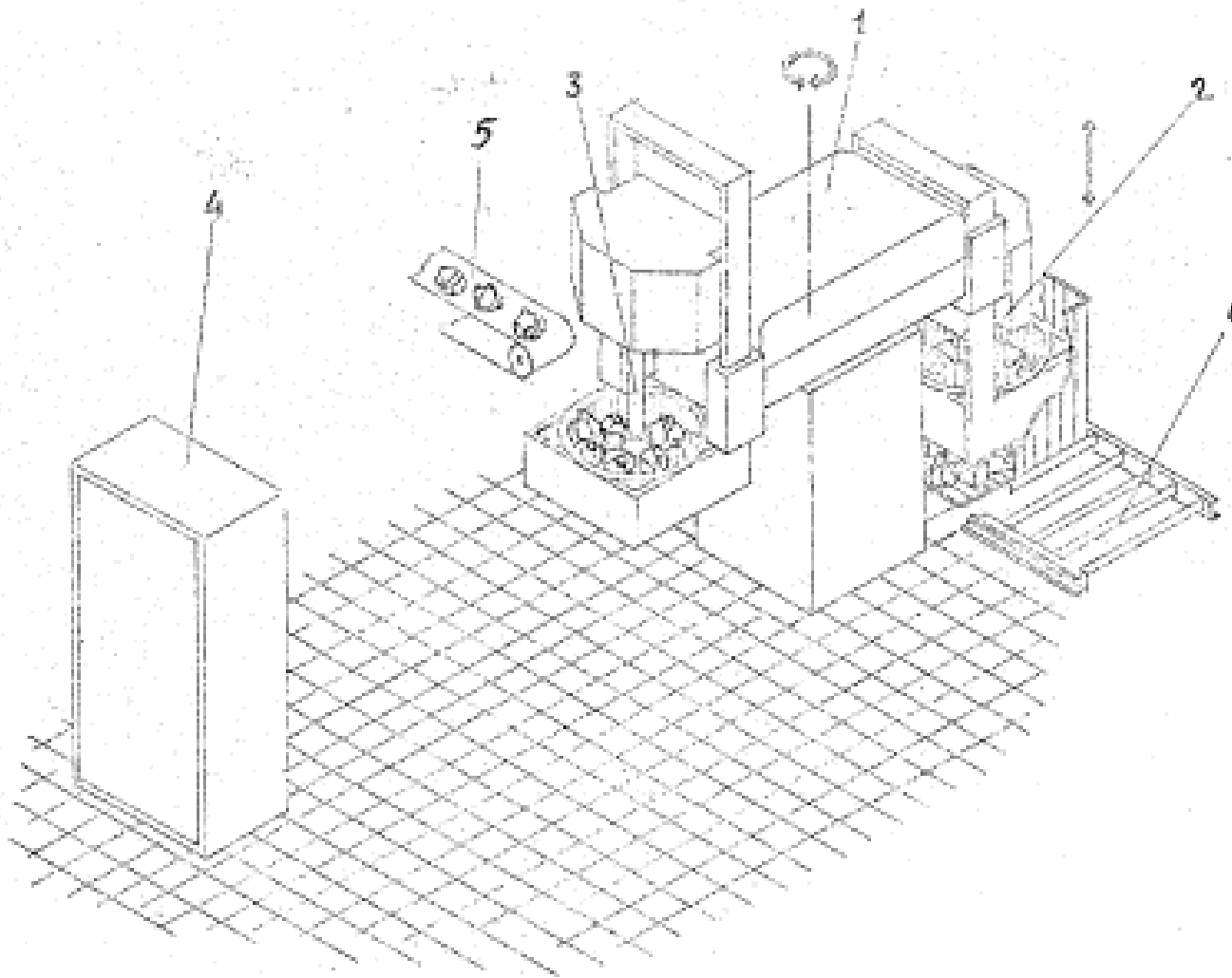


**Рисунок 14.3. Схема робота-маніпулятора**



**Рисунок 14.4. Робототехнічна система збирання тепличних огірків**

На рис.14.5. наведено роботу технічну систему завантаження капусти, її очищення та завантаження в спеціальну тару. В мехатронній системі робота використано:1- робот завантажувальник, 2,3- маніпулятори,4- пристрій керування, 5- транспортер готової продукції, 6- подавальник.



**Рисунок 14.5. Робототехнічний комплекс сортування капусти**

У підручнику в інших темах теж будемо розглядати різного типу мехатронні пристрої, мехатронні комплекси, робототехнічні мехатронні пристрої, робототехнологічні комплекси, як с точки зору засобів технологічного оснащення, а також як взаємозв'язану синергетичну систему керування. Вона обов'язково включає промисловий робот, який автоматично виконує декілька функцій (операцій) виробничого процесу.

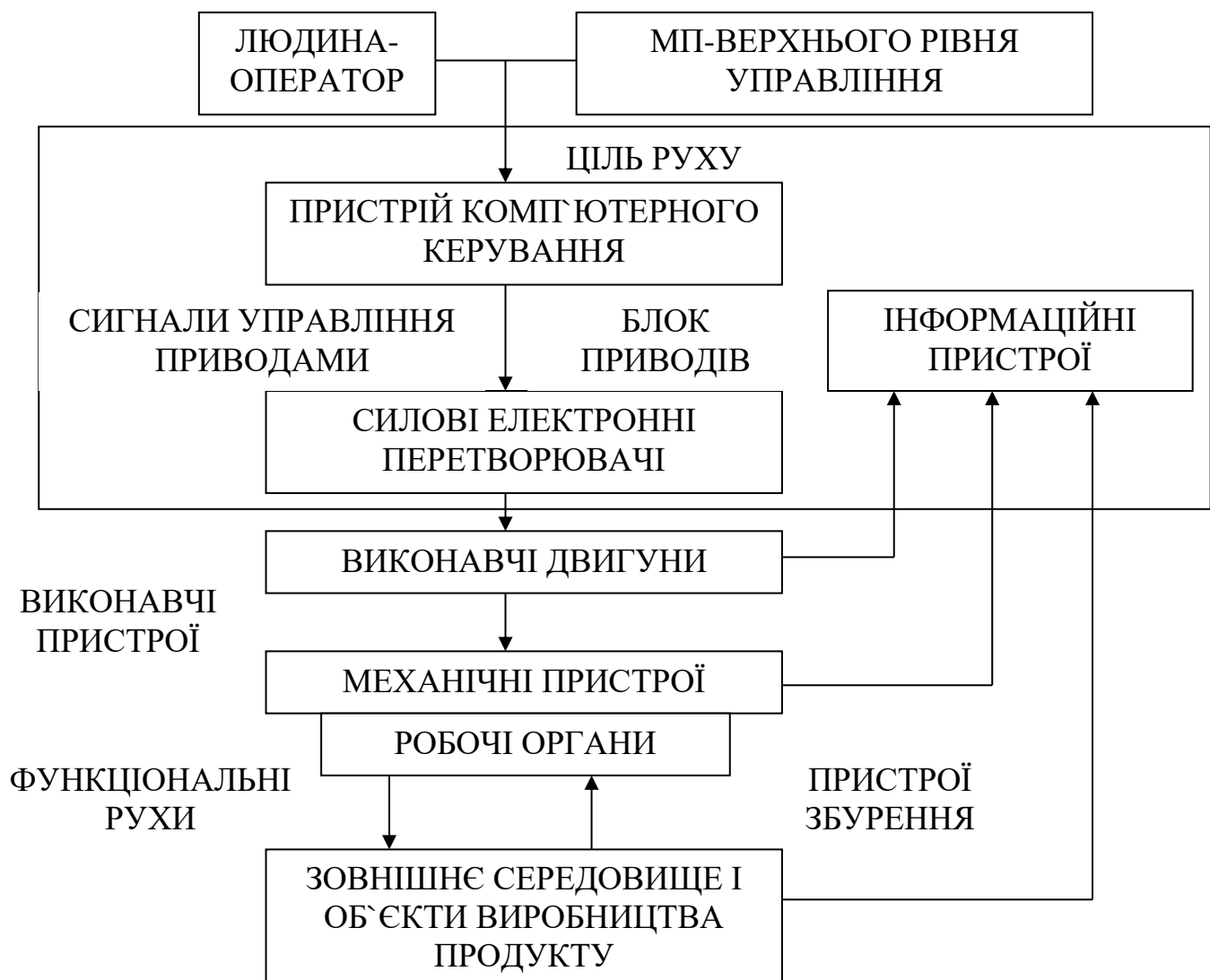
У наведених вище прикладах (рис.14.2-14.5) робототехнологічних комплексів необхідно звернути увагу на наступні складові: основне технологічне обладнання у тому числі і промисловий робот, інструмент, транспортну систему, пристрої збереження матеріальних потоків, які проходять через промисловий робот, систему енергоспоживання, систему видалення відходів, автоматизовану система керування робототехнологічним комплексом,

системи енергозабезпечення та забезпечення безпеки( захисту від кібератак,розпізнавання аварій та аварійних ситуацій). Крім цього необхідно відмітити, що робототехнологічні комплекси від будь-якої системи машин і апаратів харчової промисловості відрізняється наявністю хоч би одного промислового робота, що народжує специфіку проектних рішень щодо використання робототехнічних комплексів у харчовій промисловості.

На рис. 14.6 наведено узагальнену схему робототехнологічного комплексу, до складу якого входять: 1) верхній рівень з мікропроцесорною системою керування; 2) середній рівень з інтелектуальною системою керування приводами рук та інших силових електронних перетворювачів; 3) нижній рівень з робочими органами і виконавчими механізмами і системою оцінки зовнішнього середовища. Робототехнологічний комплекс відрізняється від інших адаптивних систем керування виробництвом продуктів здорового харчування високим рівнем інтелектуальної автоматизації та чітким виконанням цілей верхнім рівнем виконання. Це дозволяє одержати продукти високої якості з мінімальною втратою якісних споживчих характеристик.

Сучасні роботизовані виробництва продуктів харчування в Японії, США, Німеччині широко використовують інтелектуальні роботи. Наприклад, фірма Siemens (Німеччина) розробила ПР, вантажопідйомність якого більше 1000кг і, який може виконувати операції завантаження / вивантаження, а також укладання готової продукції в упаковку. Крім цього ПР самостійно проводить контроль якості продукції.

Роботизована рука – Covariant використовує технології штучного інтелекту і може навчатись самостійно. Алгоритми робота аналізують положення предмета в просторі, обчислюється кут, з якого краще взяти його, адаптуючи послідовність рухів для кожної операції. Спочатку роботизованою рукою керував оператор. Це дало змогу оператору навчити систему штучного інтелекту ПР, а після кожної маніпуляції система записувала послідовність дій та аналізувала їх. Після навчання роботизованої руки оператором вона змогла самостійно розпізнавати до 1000 предметів, що дозволяє мінімізувати витрати ресурсів, а головне прискорити їх логістику. АСВ- роботи – автоматично керовані транспортні засоби, які працюють автономно. Завдяки вбудованим датчикам ці роботи легко їздять по території цехів підприємства, виконуючи різні рутинні операції.



**Рисунок 14.6. Узагальнена структура робототехнологічного комплексу виробництва продуктів здорового харчування**

З розвитком мехатроніки та робототехніки на підприємствах харчової галузі з'явилися нові професії, серед них:

Інженер-мехатронік – це спеціаліст, який працює у сфері науки, техніки розуміється в механіці, а його праця спрямована на створенні гнучких виробництв продуктів здорового харчування, а також на розробці та експлуатації машин і цілих робототехнічних комплексів з комп'ютерним управлінням рухом виконавчих систем.

Процес проектування інноваційного обладнання для безлюдних технологій виробництва продукції харчування дає змогу ввести в номенклатуру нові професії:

1. Інженер - оператор робототехніки, виконує керування і підтримання працездатності робототехнічних комплексів на виробництві і в сфері послуг, а також відповідає за безпеку роботи персонала з роботами, проектує системи взаємодії роботів з системами керування верхнім рівнем.

2. Консультант по робототехніці, розбирається у морально – етичних, соціальних та юридичних аспектах взаємодії роботів і людей, розробляє рішення щодо визначення зон відповідальності системних архітекторів, операторів, володарів за «вчинки » машин, права і свободи робототехнічних систем, визначення робота як суб'єкта права тощо. Отже, консультант по робототехніці не лише розробляє правила взаємодії людей та роботів в умовах високого рівня автоматизації та впровадження робототехнологічних комплексів, а також розробляє методи підвищення продуктивності праці на підприємствах галузі.

### **Контрольні запитання**

1. *У чому сутність робототехніки*
2. *Опишіть сучасне уявлення про робототехніку та мехатроніку.*
3. *Поясніть сутність синергетики*
4. *Дайте визначення поняттю «технічний зір».*
5. *Принцип дії захоплювальних пристроїв промислових роботів*
6. *З яких елементів робота складається електромеханічний привід?*
7. *Коли були розроблені перші інтелектуальні роботи?*
8. *Назвіть і охарактеризуйте датчики в системах розпізнавання та технічного зору роботів і мехатронних пристроїв*
9. *Принцип дії роботизованої руки.*



## **Тема 15. Автоматизовані системи управління підприємствами харчової промисловості**

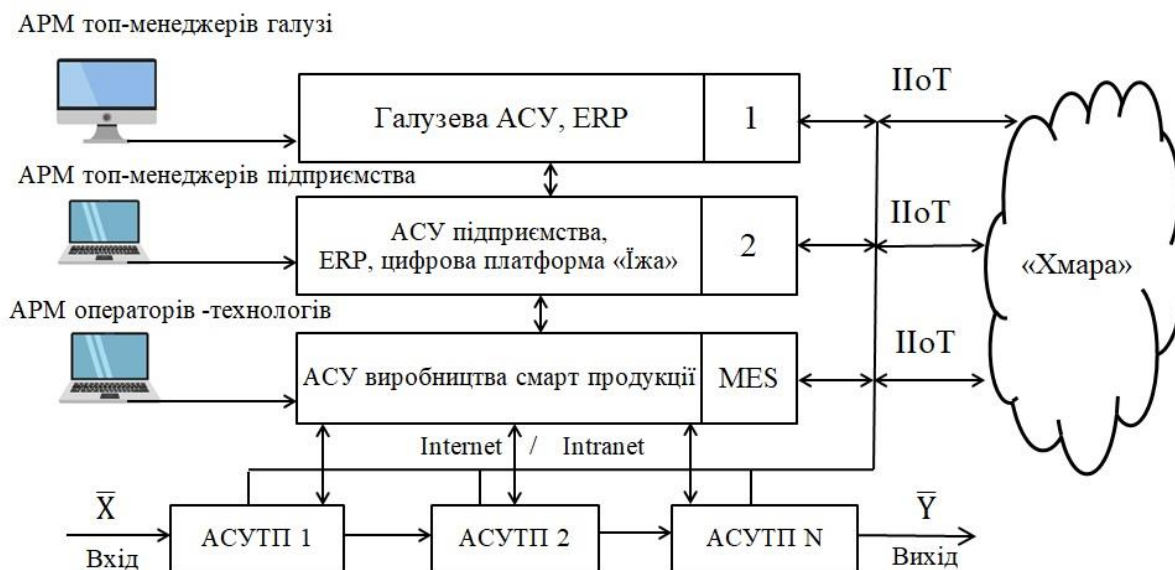
### **15.1. Автоматизовані системи управління підприємством та роботизованими процесами (АСУ-АСУТП-РТК) виробництва смарт-продуктів харчування**

Сучасні високого рівня автоматизації АСУ- АСУТП--РТК людино-машинні системи, які забезпечують автоматизоване збирання, обробку інформації та роботизоване управління технологічними об'єктами у відповідності з визначеними критеріями. Корпоративні підприємства харчової промисловості України, що оснащені високопродуктивним обладнанням, використовують передові багатоступеневі технології, тому впроваджені у виробництво системи управління ними можуть відрізнитись за типом об'єкту управління, характером і об'ємом обчислювальних задач, критеріями управління підприємством. Системи керування технологічним процесом бувають двох видів: автоматизовані і автоматичні. Автоматизована система керування пропонує участь людини (оператора - технолога) в якості складової частини структури управління підприємством, а автоматична система може функціонувати без участі людини (за виключенням проведення профілактичного контролю, ремонту обладнання тощо).

Системи автоматизованого керування (САК) – це сукупність пристроїв, алгоритмів, бази даних, бази прецедентів, бази знань, математичних моделей, які забезпечують керування об'єктом безпосередньої участі людини. САК виконує наступні функції керування: автоматичне регулювання; каскадне і програмне регулювання; багатозв'язане автоматичне регулювання; логічне керування (блокування); оптимальне керування перехідними процесами та режимами виробництва продукції; оптимальне керування з адаптацією та зміною структури алгоритмів й параметрів системи.

Критеріями управління АСУТП є техніко-економічні показники (наприклад, собівартість готового продукту, продуктивність технологічного об'єкту керування (ТОК) при стандартному показнику якості продукції). АСУТП - одне із найбільш специфічних використань обчислювальної техніки. ЕОМ та пристрої, які входять до складу АСУТП, керують ТОК та функціонують в реальному часі і, які реалізують технологічний процес виробництва смарт-продуктів харчування. При цьому обчислювальна техніка забезпечує: виконання задач запуску та зупинки обладнання, контролю його стану і захисту від перевантаження, підтримання заданого режиму роботи обладнання та стабілізації окремих технологічних параметрів, оптимізації якісних і кількісних показників роботи окремих агрегатів і технологічних дільниць підприємств у цілому, цифрового керування технологічним процесом і т.п. Щодо призначення АСУТП на підприємствах харчової промисловості слід розуміти цілеспрямоване проведення технологічних процесів для одержання в достатній кількості харчових продуктів здорового харчування з найменшими затратами і забезпечення суміжних та галузевих АСУ необхідною інформацією.

Ієрархія автоматизованих систем управління підприємствами харчової промисловості представлена на рис. 15.1.



**Рисунок 15.1. Ієрархія АСУ на підприємствах харчової промисловості  
1 –адміністративний рівень,2- рівень топ -менеджерів підприємства**

Очевидно, що АСУТП підприємств в цій ієрархії є нижнім рівнем керування виробництвом смарт-продукції та забезпечує високотехнологічне виробництво, і стандартну якість продукції харчування. Завданням розробників АСУТП на даному етапі розвитку харчової промисловості України є впровадження цифрових систем, робототехнологічних комплексів, які будуть зменшувати матеріальні та енергетичні затрати, створювати екологічну стійкість і надійність виробничих структур, а головне гарантують функціонування системи в заданих значеннях оптимізації технологічних параметрів.

Основними завданнями оптимізації технологічних процесів є:

- пошук та підтримання оптимального режиму, який характеризується вектором вхідних параметрів стану об'єкту керування  $X$  та відповідного вектору вихідних чинників  $Y$ ;
- переведення технологічного обладнання з одного режиму роботи в інший з метою гнучкого виробництва продукції здорового харчування за допомогою цифрових систем керування;
- оперативне керування групою технологічних ліній (робототехнологічних комплексів) за рахунок алгоритмів координації та узгодженого управління виробництвом продукції;
- структурне управління групою підприємств - постачальників галузі. щодо виробництва смарт - продукції, енергозабезпечення, викидів  $CO_2$  з платформами машинного навчання (ML), виведення в ремонт обладнання (смарт - ремонт), вмикання резерву, діагностування стану обладнання з метою мінімізації впливу на навколишнє середовище;

- оптимальне планування виробничих програм та потоків грошей за допомогою ERP-систем з використанням хмарних технологій і ПЗ з метою фінансового моделювання бізнес-процесів та проєктів розробки смарт-продуктів.

Таким чином, оптимізація процесів виробництва продукції здорового харчування для регіонів з техногенним забрудненням буде подана у вигляді наступної моделі виду:

$$J = F(X,U,Y,Z,t) dt, \quad (15.1)$$

де  $X,U,Y, Z$ – вектор параметрів стану відповідно об'єкта управління, сигналів керування, вихідних змінних, збурень;

$F$ - функціонал. Значення критерію  $J$  за інтервал часу  $[0,t]$  має досягти екстремуму -min або max залежно від змісту задачі, наприклад максимальна продуктивність або мінімальні витрати продукту. Для досягнення мети введемо поняття оптимального управління підприємством:

$$U(t) = \operatorname{argextr} J, \quad (15.2)$$

яке в системі має здійснюватись так, щоб критерій оптимальності  $J$  сягав екстремуму за час роботи об'єкта.

Для автоматизованих виробництв важливим є наявність обмежень, тому що вхідні-вихідні параметри мають завжди обмеження або допустимий діапазон змін:

$$X_{\min} \leq X_i \leq X_{\max} \quad (15.3)$$

Концепція використання ERP систем в АСУ-галузі та в АСУ підприємств тісно пов'язана з комп'ютеризованими інтегрованими виробництвами продуктів харчування (СІМ), в яких ERP верхнього рівня призначені для управління фінансами та господарською діяльністю.

До загальних задач використання ERP необхідно віднести управління матеріальними і фінансовими ресурсами, збутом, замовленнями споживачів і постачання, управління кадрами, основними фондами, бізнес-планування і облік, бухгалтерія, розрахунки з організаціями-постачальниками, банками тощо. За допомогою ERP-систем на рівні галузі та підприємств України виконуються механізми управління з підприємствами країн ЄС, Азії, Африки, включаючи підтримку декількох часових поясів, мов, валют, систем бухгалтерського обліку і звітності.

Сучасні програмні продукти дозволяють побудувати платформу «ІЖА», яка на основі комунікаційно-інформаційних технологій, IoT і хмарних технологій, забезпечує виробництво смарт-продуктів, що відповідають європейським стандартам.

При цьому верхній рівень підприємств галузі в реальному масштабі часу виконує оцінку економічного прибутку:

$$EP = \text{NOPLAT} - (IC * \text{WACC}), \quad (15.4)$$

де EP - економічний прибуток підприємства,  
NOPLAT- чистий операційний прибуток підприємства з врахуванням скорегованих податків,

IC- об'єм капіталу інвестованого в операції виробництва смарт- продукції харчування,

WACC- середньозважені затрати на капітал підприємства або міра ризику невиконання портфеля замовлень країн ЄС, Азії, Африки та внутрішнього ринку.

В АСУ галузі та АСУ підприємств інформаційно-управлінські системи узгоджені між собою, що дозволяє топ-менеджерам галузі на основі нейро - мережевих систем прогнозувати виробничі показники, щодо продуктивності смарт-продукції та своєчасне виконання портфеля замовлень.

Такий підхід дає змогу розробити інтелектуальну систему управління мережею галузевих підприємств харчової промисловості, об'єднаних інтернет мережею ІоТ, ПЗ, ERP, MES-систем і з АСУТІ –РТК на нижньому рівні. Розвиток стандартів ERP, MES-цифрового управління повинно бути узгодженим зі стандартами якості.

Два ці напрямки (організація і управління виробництвом та управління якістю) зв'язані між собою та є інструментами підвищення потенціалу підприємства (під потенціалом будемо розуміти сенс одержання економічного прибутку в майбутньому).

Архітектура інформаційно-управлінської системи підприємств галузі буде ефективною, якщо в реальному масштабі часу народ України буде одержувати продукти здорового харчування в достатньому об'ємі та в широкому асортименті продуктів високої якості.

Під якістю харчового продукту будемо розуміти сукупність біологічних, харчових і технологічних властивостей та ознак, які визначають його придатність до споживання. Відповідно до державних і міжнародних стандартів під якістю продукції розуміють сукупність властивостей, які складають якість, а також здатність продукції задовольняти потреби у відповідності з її призначенням. Показником якості продукції є - кількісна характеристика однієї або декількох властивостей продукції, складових якості. Рішення проблеми підвищення якості продукції харчування вимагає постійного удосконалення та забезпечення достовірності одержаної інформації засобами вимірювання, системами контролю і управління параметрами технологічних процесів виробництва. При цьому основною задачею систем керування якістю в АСУ підприємств є мінімізація браку в процесі формування якості продукції. Для цього необхідно об'єктивно та достовірно в реальному масштабі часу оцінювати якість продукції здорового харчування в процесі виробництва та збереження. Це можливо в умовах впровадження інтелектуальних підсистем управління якістю (ІПУК) на основі збирання, оброблення, аналізу і збереження інформації про стан контрольованого об'єкту (продукту) при якісному метрологічному забезпеченню. Основним засобом одержання інформації про

стан контрольованого об'єкту є вимірювання, якість яких залежить від точності використання засобів вимірювання та рівня їх метрологічного забезпечення (МЗ). Індикатором ефективності контролю та управління якістю продукції харчування є достовірність вимірюваної інформації та якості МЗ. Структура і функції вимірюваних засобів однозначно узгоджені, але функція вимірювання є визначальною. Якість вимірюваної інформації визначається її основними властивостями: оперативністю, повнотою, точністю, достовірністю і співставленістю. Метрологічне забезпечення вимірювань – комплекс нормативно-технічних документів, які встановлюють правила та положення, що відносяться до забезпечення точності вимірювання.

Під *метрологічним забезпеченням АСУТП* харчової промисловості регіону з техногенними територіями в підручнику будемо вважати «систему наукової, технічної, правової та організаційної діяльності направленої на забезпечення, шляхом інтелектуального керування, відповідності характеристик якості харчових продуктів встановленим нормам (сертифікату НАССР) на основі досягнення єдності процесів перетворення інформації (інформаційних процесів) в АСУТП».

Кожна із АСУТП має свою вимірювально-інформаційну систему (ВІС), пов'язану з керуючими системами нижнього, середнього і верхнього рівнів управління. Сформована вимірювально-інформаційна система виконує функції контролю, діагностики, випробовування, розпізнавання, визначення аварійних ситуацій і т.п. Ця система стимулює розвиток комп'ютерних технологій, засобів вимірювання (ЗВ), керуючої і виконавчої підсистем в складі АСУ-АСУТП підприємства і галузі. При цьому під ЗВ будемо розуміти комплекс приладів, інтелектуальних датчиків, за допомогою яких експерти автоматизованого керування будують БД, БЗ інформаційних систем. Засоби вимірювання можуть функціонувати незалежно один від іншого, а також в складних структурах вимірювання та організації взаємодіючих процедур з інтелектуальними системами візуалізації та опосередкованого контролю параметрів. Таким чином, ЗВ необхідно розглядати як складовий елемент вимірювально - інформаційної і керованої системи управління підприємством. Вимірювально - інформаційна система - визначається як «інформаційна система, яка має в якості підсистем(елементів) вимірювальні перетворювачі, прилади або вимірювальні системи». Серед функцій автоматизованих систем керування виокремлено: вимірювальні, обчислювальні та керувальні. Таким чином, визначилось спрямування до розуміння системи як сукупності всіх підсистем та функцій., в якій важливу роль відіграє обчислювальна функція як частина вимірювальної (ГОСТ-26.203-81).

Відповідно принципам метрологічного забезпечення, ВІС та АСУТП відзеркалюють специфіку цих систем, яка полягає в агрегатному способі побудови, комплектовані в багатьох випадках безпосередньо на об'єкті, нерозривного зв'язку з об'єктом, розподіленості в просторі, багатоканальності, багатофункціональності, гнучкості структури і наявності у своєму складі ЕОМ. Включення до складу ВІС та АСУТП сучасних засобів комп'ютерних систем має два важливі наслідки, які змінили погляд на

систему керування. По - перше, розширились функції систем, що пов'язано з обробленням результатів вимірювання. По-друге, змінилось співвідношення між числом задач перетворення сигналів, які виконуються за допомогою апаратних і програмних засобів, на користь останніх.

**Тому за рахунок програмних засобів в інтелектуальних вимірювальних системах використовуються комп'ютерні засоби оброблення інформації, які підвищують точність цих систем.**

Визначальним для ВІС є рівень ефективності досягнення тих цілей, за ради яких вона спроектована, тобто для контролю, випробувань, діагностики, обслуговування, розпізнавання і т.п., але для АСУТП – для керування.

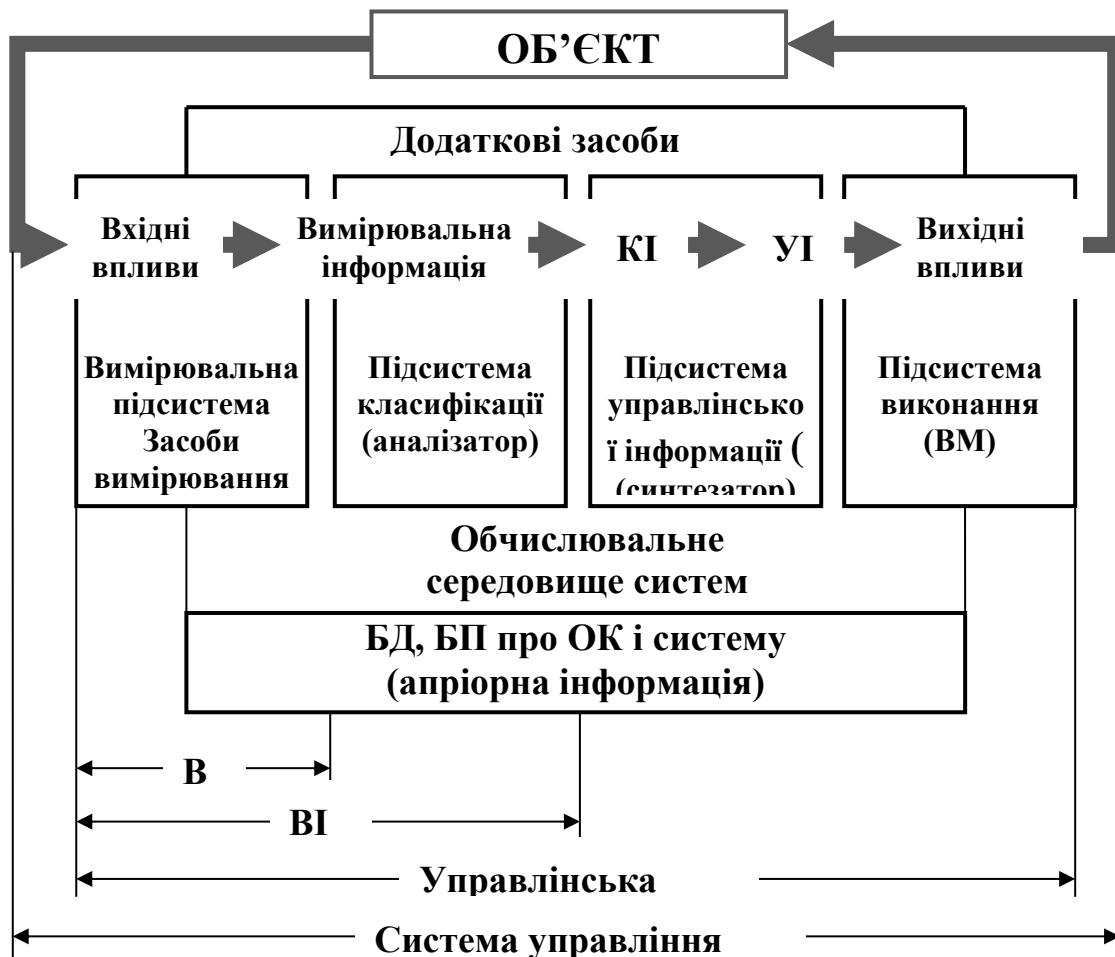
Відомо, що якість функціонування ВІС та АСУТП можливо характеризувати точністю, тому потрібно використати методи метрологічного забезпечення (МЗ) для ВІС і АСУТП і розповсюдити їх націльові, не вимірювальні функції. Ці положення складають основу концепції цілісності МЗ вимірювально- інформаційних та керувальних систем. **Сутність** концепції полягає в тому, що в якості об'єкта МЗ розглядаються системи в цілому, включаючи не вимірювальні підсистеми і функції. Методологічною основою концепції слугують два функціональних положення. Перше полягає в тому, функції контролю, випробувань, діагностики, виявлення та розпізнавання, а також вимірювальна функція складають сутність функції класифікації (рис.15.2).

Технічний контроль виконують на основі вимірювання деякої сукупності параметрів об'єкта ( наприклад. технологічного процесу).

Мова в цьому випадку іде про класифікацію станів системи на два класи: норма і не норма.

Технічна діагностика представляє собою двохетапну класифікаційну процедуру: спочатку об'єкт відносять до одного із класів – працездатний або непрацездатний, а потім- до одного із підкласів, який визначає запас працездатності або характер не працездатності відповідно.

Розпізнавання образів також відноситься до задач класифікації, тому що необхідно визначити ознаки об'єктів, які визначають образи, розділення простору ознак на області, які характеризують класи станів об'єктів, і визначення конкретних об'єктів, на основі вимірювання їх ознак віднесення їх до відповідних класів. Якщо класи розділяють простір на дві області, то розпізнавання стає двоальтернативним, тобто зводиться до виявлення об'єкту. Термін «процес перетворення інформації» слід розуміти у широкому сенсі слова.



**Рисунок 15.2 - Структура перетворення інформації в системі управління підприємством: ВС – вимірювальна система; ВІС – вимірювальна інформаційна система; БД – база даних; БП – база прецедентів; КІ – класифікаційна інформація; УІ – управлінська інформація; ВМ – виконавчі механізми**

Він об'єднує: процеси визначення інформації; процеси сприйняття інформації від вторинних її джерел, коли інформаційні засоби безпосередньо взаємодіють з об'єктом, який є носієм уже визначеної інформації; процеси перетворення інформації із одної форми в іншу; процеси передачі, збереження та оброблення інформації; процеси перетворення управлінської інформації в фізичні впливи (становище), наприклад у виконавчій підсистемі (перетворення інформації в реальноіснуюче різноманіття). Головним при формуванні інформації для ВІС та АСУТП є процедура вимірювання. В її основі лежить порівняння вимірюваної величини з однорідною величиною, яка прийнята за одиницю, або зі шкалою. Основним завданням АСУТП є підтримання заданого режиму роботи технологічного об'єкту керування (ТОК), шляхом розпізнавання та мінімізації відхилень від оптимальних значень технологічного процесу. Ця задача виконується за допомогою традиційних функцій контролю, регулювання і керування з використанням різних способів вимірювання, ідентифікації, оптимізації та адаптації.

Оперативний персонал розглядає систему керування як додатковий засіб, який полегшує йому виконання основного завдання: введення технологічного процесу у відповідності зі заданим регламентом. В обов'язок персоналу входить: нагляд за технологічним процесом, розпізнавання проблемних ситуацій; втручання при відхиленнях від заданого режиму, у тому числі і в аварійних ситуаціях, шляхом зміни самостійно деяких параметрів сировини, інгредієнтів тощо, параметрів регуляторів(установок); переключення структурних зв'язків і т.п.; аналіз причин порушення, прийняття рішень щодо їх усунення. Сукупність цих дій зв'язана з функцією оперативного керування. Щодо її реалізації велике значення надається наявності процедур, в яких система веде оператора, підказуючи йому рішення в аварійних ситуаціях. Організація керування в АСУТП вимагає одержання інформації про хід технологічного процесу та визначення оптимального режиму роботи об'єкта керування з реалізацією визначених оптимальних керуваних впливів на ТОК. Складність керування ТОК визначається великим розмахом вектора інформації, методами її оброблення і різними формами використання результатів.

Будь-яка АСУТП-РТК є багатофункціональною системою, тобто має зовнішні та внутрішні функції. Зовнішніми є функції, які визначають призначення системи; внутрішні - службові функції, які забезпечують якісне виконання основних, зовнішніх функцій. Зовнішні функції АСУТП розділяють на інформаційні та управлінські. До інформаційних відносять функції системи, результатом виконання яких є надання оператору ТП або зовнішнім споживачам інформації про стан керованого процесу.

Інформаційними функціями АСУТП є: контроль поточних значень основних параметрів процесу ( $X_{max}$ ,  $Y_{max}$ ); перевірка відповідності параметрів процесу заданим оптимальним значенням ( $X_{opt}$ ,  $Y_{opt}$ ) та інформування персоналу про виникнення невідповідальності; вимірювання і реєстрація параметрів або комплексних показників, які не можливо контролювати(вимірювати) безпосередньо (якість харчового продукту); розрахунок техніко-економічних показників (ТЕП) роботи ТОК тощо. Управлінські функції АСУТП включають заходи щодо формування і реалізації управлінських впливів на ТОК. До них віднесені наступні функції: стабілізація оптимально заданих параметрів ТП щодо значень, які визначені технологічним регламентом ( $Y = const$ ); програмне керування за заданими програмами, у тому числі пуск і зупинка окремих машин та апаратів, логічне керування в типових ситуаціях, визначення «вузьких місць» і узгодження навантажень послідовно працюючих апаратів; формування та реалізація керуючих впливів, забезпечення досягнення режиму роботи апарата, оптимального за технологічним або техніко-економічним критерієм. Допоміжні функції АСУТП забезпечують власне їх функціонування, тобто задають алгоритми функціонування системи, слугують для діагностики стану комплексу технічних засобів (КТЗ), формування бази даних, бази прецедентів і введення інформаційної бази. Таким чином, функціонування АСУТП виконується за рахунок взаємодії її складових частин: інформаційного забезпечення, програмного забезпечення, технічного забезпечення, організаційного забезпечення і дії оперативного персоналу.



Інформаційне забезпечення (ІО) – це сукупність систем кодування і класифікації технологічної та техніко-економічної інформації, сигналів, які характеризують стан ВТК, довідкової та оперативної інформації. До складу інформативного забезпечення входить математичне забезпечення, яке складається із математичних методів і алгоритмів рішення задач, методів оброблення інформації та формування команд керування для впливу на технологічні процеси.

Програмне забезпечення (ПЗ) - це сукупність програм для засобів обчислювальної техніки, які забезпечують реалізацію інформаційної функції АСУТП. Воно складається із загального(системного) ПЗ і інших засобів обчислювальної техніки, інструментального ПЗ, за допомогою якого виконується розробка прикладного ПЗ, забезпечуючого рішення конкретних задач функціонування ТОК відповідно заданим алгоритмам керування. Технічне забезпечення (ТЗ)- це комплекс технічних засобів, які забезпечують формування інформації про стан ТОК; одержання і передачу інформації; її оброблення і формування керуючих впливів; уявлення інформації оперативному персоналу; керування виконавчими механізмами для впливів на технологічний процес; передачу інформації в суміжні або в рівень АСУ.

Організаційне забезпечення (ОЗ) – включає опис функціональної, технічної та організаційної структур, регламенти і інструкції для оперативного персоналу. Оперативний персонал (ОП)- це технологи-оператори ВТК, які виконують керування ТОК, і експлуатаційний персонал, який забезпечує функціонування системи в цілому. Ступінь участі операторів в керуванні ТОК залежать від рівня автоматизації, Сучасний рівень автоматизації ТОК дозволяє поступово виводити оператора із контура керування і передає його функції технічним засобам. При цьому оператор повинен контролювати роботу КТЗ і приймає рішення у аварійних ситуаціях. По способу реалізації інформаційних та управлінських функцій і по структурі АСУТП підрозділяють на:

1. АСУТП, функціонуючі без програмно - технічного комплексу, який забезпечує керування окремими апаратами, агрегатами за допомогою локальних систем (дистанційне керування, автоматичне регулювання, сигналізація, вимірювання за програмою та інші функції). Обмін інформацією виконується людиною ( оператором - технологом) завдяки реєстрації поточної інформації в журналах у вигляді таблиць, графіків і т.п.

2. АСУТП, функціонуючі з ВТК, виконують інформаційні функції централізованого контролю, обробка інформації і реєстрації ТЕП. Вибір керованих впливів, режимів роботи виконує оператор – технолог.

3. АСУТП, функціонуючі з ВТК в режимі «порадника», коли ВТК виконує інформаційні завдання. На основі аналізу вхідної інформації «порадник» генерує рекомендації щодо керування виробничим процесом і виконує пошук оптимальних рішень, які приймаються і реалізуються оперативним персоналом.

4. АСУТП, функціонуюча в автоматичному режимі, при якому ВТК реалізує керувальні функції, з метою автоматичного формування і виконання

керуваних впливів на ТОК. При цьому реалізується супервізорне керування, коли засоби управлінського обчислювального комплексу (УОК) автоматично змінює уставки І (АБО) параметри налагодження локальних систем адаптивного керування (ЛСАК) регулюючими пристроями.

5. АСУТП, реалізує автоматичний режим прямого цифрового керування (ПЦК), в якому ВТК реалізує керувальні функції. Структура АСУТП, діюча в режимі ПЦК, може бути реалізована, наприклад при випіканні хлібобулочних виробів та в інших стадіях виробництва продуктів здорового харчування. З кожним роком цифровізація в Україні набуває значних темпів і відповідно комп'ютеризація технологічних процесів в АСУ-АСУТП харчової промисловості. Проблема комплексної автоматизації стає актуальною для кожного із підприємств харчової промисловості.

6. АСУТП-РТК реалізує безлюдний спосіб виробництва продуктів здорового харчування з використанням робототехнологічних комплексів, інтелектуальних систем з штучним інтелектом та коботів.

Це обумовлено наступними причинами – підвищенням ролі Індустрії-4.0 щодо стратегічного розвитку галузі до 2035 р. та впровадження безлюдних технологій у виробництво;

- підвищенням ролі організаційної і фінансової самостійності підприємств галузі;

- виходом на ринки країн ЄС

- орієнтація підприємств на ефективність бізнес – процесів

- діяльність, яка представляє цінність для клієнтів;

- появи на ринку закордонних і вітчизняних систем автоматизації на основі мікропроцесорних апаратно-програмних засобів, досвіду їх впровадження і використання в складі АСУТП-РТК, промислового інтернет-речей, сучасних комунікаційних засобів, інтелектуальних систем керування ТП;

- розробка і проектування АСУТП на базі SCADA – систем.

В SCADA- системах використовується принцип модульного проектування систем керування, реалізованого в двох основних варіантах: - в першому варіанті для системи, яка забезпечує повний набір функцій, створюються додаткові пакети - опції, які реалізують не обов'язкові щодо використання функції контролю і керування, наприклад SPS, BatchControl; - в другому варіанті система створюється із функціональних модулів, які реалізують окремі функції контролю і керування. Модулі, як правило, незалежні та можуть використовуватися на окремих функціональних станціях. Таким чином, створюються станції нагляду, станцій – концентраторів даних, станцій з вільно формованим набором функцій.

Важливим аспектом в структурній побудові мережевих СК є визначення структури БД РЧ в мережевій системі: централізована або децентралізована. Кожна із цих основних структур в SCADA- системах реалізується по різному; від способу реалізації ефективність БД, її надійність, можливість модифікації і т. п.

SCADA- системи (виробників комп'ютерної продукції) забезпечують розширення в ієрархії рівня керування виробництвом продукції харчування «по

вертикалі» - у напрямку безпосереднього керування (автоматичне регулювання і програмно-логічне керування), а також в напрямку цифрового керування виробництвом смарт-продукції.

Сучасні програмні системи представляють собою потужні програмні комплекси, які забезпечують інтелектуальне управління підприємством та його виробничими структурами в цілому. Використання в системах різних рівнів єдиного стилю оформлення, термінології, інструментарію, службових засобів значно полегшує проєктантам розробку інтелектуальних «смарт-підприємств» (АСУ підприємств) - їх впровадження та експлуатацію робототехнологічних комплексів.

## **15.2. Функції цифрового керування верхнім рівнем АСУ**

Функції цифрового керування реалізуються в пакетах прикладних програм для мікропроцесорів нижнього рівня керування, персональних комп'ютерів середнього та ЕОМ верхнього рівнів.

На середньому рівні управління підприємством - рівень MES (ManufacturingExecutingSystem) - систем експерти рекомендують використовувати – системи SCADA/HMI для АСУТП. Збирання, відображення, архівування даних а також протоколювання процесу виробництва засобами SCADA/HMI- успішно використовуються в АСУ - АСУТП підприємств харчової промисловості.

На верхньому рівні АСУ, спроектованих на базі 64- розрядних ЕОМ, MES, ERP - систем важливу роль відіграють інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень, а саме: інтелектуальні системи підтримки прийняття стратегічних рішень (ІСППСР); інтелектуальні системи підтримки прийняття колективних рішень (ІСППКР) ; інтелектуальні системи підтримки прийняття оперативних рішень (ІСППОР).

На рис.15.3 наведена система підтримки інтелектуальних рішень в АСУ підприємством харчової промисловості.

Типи систем	Системи стратегічного рівня				
Системи підтримки прийняття рішень (СППР)	5-річний прогноз рівня продаж	5-річний оперативний план	5-річний бюджетний прогноз	Планування прибутку	Планування розвитку персонала
Управлінські інформаційні системи (УІС)	Системи рівня менеджменту				
Системи підтримки прийняття рішень (СППР)	Управління продажами.	Контроль запасів	Річне планування бюджету	Аналіз капітальних інвестицій	Аналіз переміщень
	Аналіз регіонів продаж	Календарне планування виробництва	Аналіз витрат	Аналіз витрат /прибутковість	Аналіз затрат по контрактах
Системи роботи зі знаннями (СРСВ)	Системи рівня знань				
Офісні системи	Інженерні робочі станції	Графічні робочі станції		Управлінські робочі станції	
	Оброблення текстів	Представлення документів		Електронні календарі	
Системи обробки транзакцій (СОТ)	Системи операційного рівня				
	Відстеження замовлень	Машинний контроль Календарне планування розумних фабрик	Захист торговельних операцій	Заробітна плата Облік кредитів	Компенсації Навчання і розробка
	Обробка замовлень	Контроль переміщення матеріалів	Управління готівковими грошовими коштами	Облік дебіторів	Підтримка записів співробітників
	Маркетинг	Виробництво	Фінанси	Облік	Відділ кадрів

**Рисунок 15.3. - Експертна система підтримки прийняття рішень**

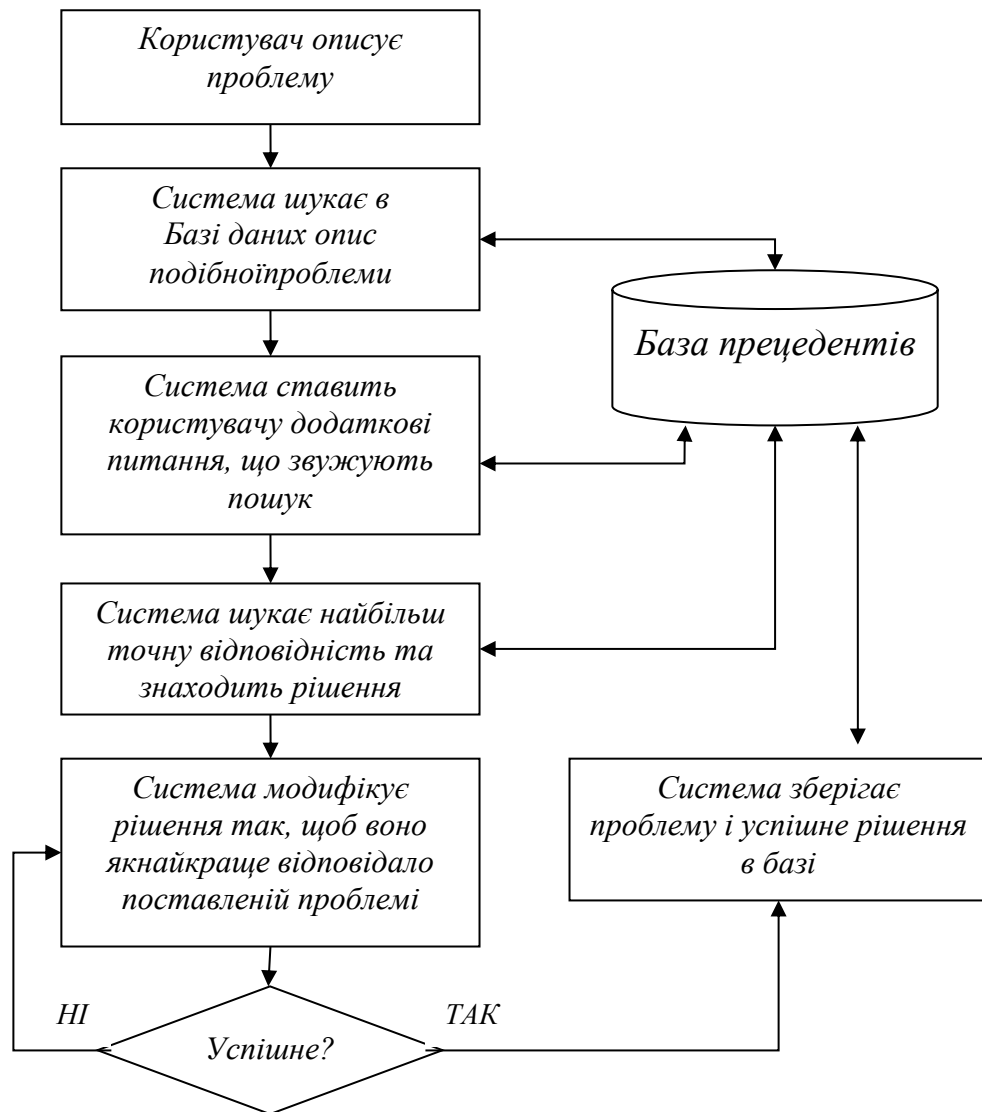
Як відомо експертні системи працюють, використовуючи базу знань і набір правил *IF-THEN-ELSE*, кожне із яких сформоване експертами – інженерами знань та взаємодіють з АСУ верхнього рівня.

CBR – системи представляють знання як ряд прецедентів. Ця база знань безперервно розширюється і удосконалюється користувачем (К).

Слід відмітити, що кожне підприємство (корпоративна структура) має свої, а інколи, лише свої ноу-хау, колективні знання та досвід, який накопичується роками в процесі виробництва хлібо-макаронних виробів. Ці організаційні знання можливо виділити і зберегти, використовуючи прецедентну аргументацію (*case-based reasoning*, CBR).

У процесі проектування смарт-продуктів харчування використаємо можливості CBR – опис минулого досвіду спеціалістів, представленого у вигляді прецедентів, зберігати в базі для наступного пошуку знань. Необхідність у такому випадку виникає, якщо користувач стикається з новим прецедентом з подібними параметрами. Система виконує пошук серед збережених прецедентів з характеристиками задачі, які подібні до нових, знаходить найбільш точну відповідність і приймає рішення старого прецедента по відношенню до нового. Успішні рішення для нового прецедента відзначаються, і вони зберігаються разом з іншими прецедентами в базі знань. Невдалі рішення також додаються в базу прецедентів поряд з поясненням того, чому рішення не спрацювало.

На рис. 15.4. наведено схему, яка пояснює принцип за яким працює прецедентна аргументація. Вона представляє знання у вигляді бази минулих прецедентів і їх рішень. Система використовує процес з шести кроків, щоб згенерувати рішення нових задач, які постають перед користувачем.



**Рисунок 15.4. – Алгоритм роботи прецедентної аргументації**

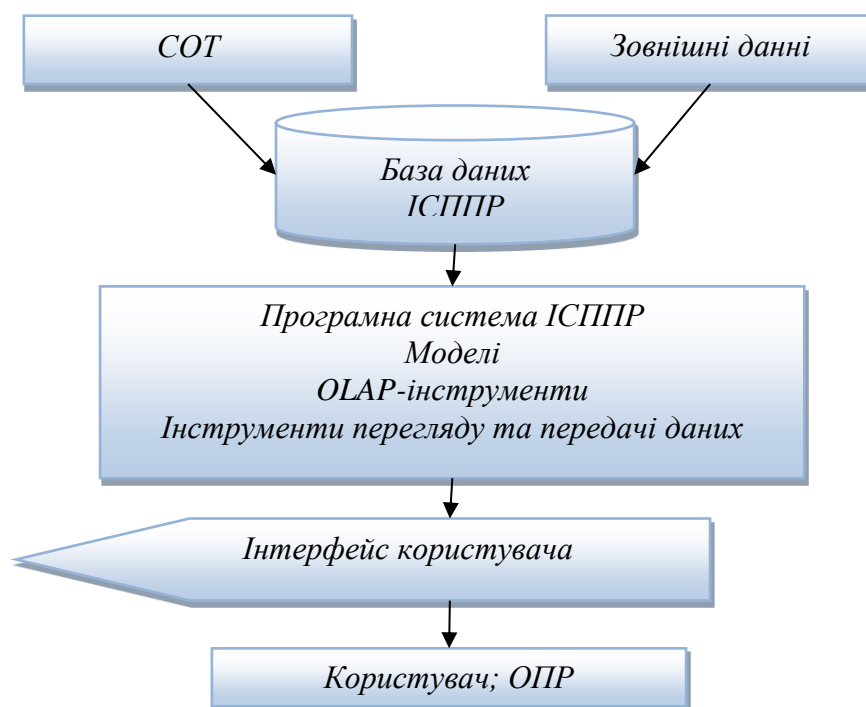
Система *OLAP* (або багатовимірний аналіз) може підтримувати значно складніші питання такі як: вибір параметрів сировини, з метою одержання смарт-продукції з доданою вартістю. На прикладі *OLAP* і орієнтованого на питання аналізу даних користувачі повинні одержати уявлення про необхідну інформацію. В основу концепції *OLAP* лежить принцип багатовимірного представлення даних.

У процесі вилучення даних використовуються інструменти статистичного аналізу, а також нейронні мережі, нечітка логіка, генетичні алгоритми або алгоритми, основані на правилах, а також інші інтелектуальні методи візуалізації даних [1,36].

На рівні інтегрованих корпоративних структур як правило приймаються лише колективні рішення, часто в групах проводиться процес узгодження інтересів до їх прийняття. В АСУ великих підприємств прийняття рішень – це колективний процес, а отже ІСППР повинні враховувати проблему прийняття колективних рішень.

На рис.15.5. наведено компоненти ІСППР. Вони включають базу даних, які використовують для запитів та аналізу, програмну систему, моделі, *OLAP*-

інструменти та інструменти перегляду та передачі даних, а також інтерфейс користувача.



**Рисунок15.5. – Компоненти ІСППР**

Використання програмного забезпечення CRM знайшло своє відображення в розвитку інтелектуальних систем підтримки прийняття управлінських рішень (ІСППР) з ситуаційними центрами і збалансованими системами керування підприємствами. Створення ситуаційних центрів (СЦ), центрів підтримки і прийняття управлінських рішень, центрів управління кризовими ситуаціями є сьогодні для підприємств харчової промисловості регіону дуже актуальним, з точки зору організації соціуму, корпоративної відповідальності за якість, безпеку продукції, екологію, здоров'я людей, тощо. Органи державної влади, регіонального рівня, громад, міст і великих інтегрованих структур, підприємств харчової промисловості заводи, повинні мати такі центри. Ситуаційні центри з OLAP-інструментами і базами даних ІСППР, програмними продуктами, інтерфейсами ОПР ефективно використовуються для оцінки матеріальних, інформаційних і фінансових потоків, диспетчеризації руху матеріальних потоків і транспорту міста, продуктивним кластером, прискорення підготовки колективних рішень, прийняття стратегічних рішень щодо розвитку корпоративних підприємств харчової промисловості до 2035 року, створення атмосфери інтелектуального лідерства і якості життя населення регіону наближеного до стандартів країн ЄС. У подальшому будемо використовувати ситуаційні центри для розробки колективних і стратегічних рішень щодо управління процесом забезпечення продуктами харчування населення техногенної території Придніпровського

регіону та міста Кривий Ріг. [1,36]. Тому ситуаційні кімнати повинні відповідати наступним методологічним чинникам:

- від точності до інтелектуальності;
- від довідкової роботи до аналітичної;
- від одного експерта до групи;
- від внутрішнього середовища до зовнішнього;
- від інерційної екстраполяції до пошуку нових шляхів розвитку;
- від реєстрації даних до екстракції знань;
- від захисту інформації від кібератак до менеджменту харчової безпеки;
- від накопичення досвіду до когнітивних схем.

Виділимо три режими роботи ситуаційного центру:

1. Режим моніторингу: у цьому режимі центр відслідковує ті чи інші процеси в конкретній сфері управління процесом забезпечення смарт-продуктами населення регіону, міста тощо.

2. Плановий: у цьому режимі розробляються колективні операційні та стратегічні рішення групою експертів; формуються доповіді з варіантами рішень і розробляються системи моделювання ситуацій.

3. Режим роботи в кризових ситуаціях: у якому при виникненні деякої події (кризи, військових дій, аномальної техногенної ситуації) потрібно зібрати необхідну інформацію, змодельовати ситуацію, запропонувати рішення і знайти оптимальне колективне рішення щодо забезпечення продуктами харчування населення в період кризи (техногенної ситуації).

Для досягнення цілей, які вирішують ситуаційні центри, потрібно створити високу інтенсивність надходження вхідної інформації, а отже і великі їх об'єми. Технологічною основою побудови ситуаційних кімнат (центрів) усіх типів слугує з'єднання кімнати-експертів за ОПР з центрами підготовки інформації.

Основним елементом СЦ є екран колективного користування, який дозволяє створити єдину інформаційну мову для осіб, які працюють в ситуаційному центрі. Екран може представляти собою відеостіну або проекційну установку. Відеостіни (тобто системи мультіекранного відображення; графіки та діаграми, текстова документація в електронному вигляді), які призначені для колективного користування, завдяки модульній конструкції можуть бути сконфігуровані індивідуально під конкретні задачі та приміщення. Ключовою властивістю для відеостін є інформаційна ємність, яка дозволяє на одному екранному полі створювати  $n$ -повноцінних зображень від багатьох джерел. Для презентації додаткової інформації використовуються монітори і відео панелі (плазменні, LED панелі). Необхідними технічними засобами оснащення СЦ також є:

- засоби відеоконференц-зв'язку, які передають зображення і звук по телекомунікаційним мережам і, які використовують різні конфігурації терміналів зв'язку – як у вигляді автономних пристроїв, так і на базі ПК;

- високоякісні звукові системи, які включають спеціальні звукові конференц-системи, а також системи управління світлом;

- електронні засоби введення графічних даних: сканери, цифрові фото і відеокамери;

- інтегровані системи управління. Такі системи необхідні в процесі управління складними апаратними комплексами, коли зміна стану системи вимагає одночасного переключення багатьох пристроїв (комутаторів, мікшерів, джерел і т.і.);

- з метою організації роботи ситуаційного центра необхідно мати декілька типових робочих станцій: презентаційну, станцію для проведення аналітичних розрахунків, студію зв'язку з абонентними пунктами для взаємодії з іншими інформаційними системами.

Без сумніву важливим елементом є інформація, яка розміщується в ситуаційному центрі. Це не лише алфавітно-цифрова інформація, з якою ми працюємо (назва показників, одиниці вимірювання, кількісні значення показників), але і текстові, картографічні, аудіо і відео бази даних, цифрові, мультимедійні бази.

На наш погляд, в останні п'ять років в Україні значно збільшився інтерес менеджерів до ситуаційних кімнат і проектування ситуаційних центрів з метою зменшення корупційних складових, збільшення конкурентоспроможності промислових комплексів з виробництва смарт-продуктів харчування і АПК регіонів, оцінки забруднення територій, тощо.

Серед цих напрямків виділимо:

- розширення спектрів вирішення задач, пов'язаних з аналізом впливу війни РФ проти України їх вплив на соціально-економічний розвиток Придніпровського регіону; проведення експертних оцінок рівня забезпечення смарт-продуктами робітників гірничо-металургійного комплексу, воїнів ЗСУ, школярів та населення, яке мешкає на території з техногенним тиском, екологічної, енергетичної, соціальної, технічної, технологічної компонент і їх комплексний вплив на гнучкість та оновлення продукції ; сталий розвиток харчової промисловості регіону; розробка колективних рішень щодо харчової безпеки регіону;

- аналіз розробки і впровадження: 3D-принт технологій в машинобудування харчової промисловості, робототехніку; нанотехнологій, зеленої енергетики за допомогою ІССПР, ІСПКР з мультіекранною презентацією інформації і використанням відеопроекторів, освоєння програмних пакетів для візуалізації великих масивів даних, впровадження інформаційного порталу, використання тривимірної графіки;

- оцінка конкурентного середовища, в якому працюють підприємства харчової промисловості регіону та його АПК;

- моделювання часу розробки смарт-продуктів харчування для населення регіону; моделювання можливого зниження ставок по кредитах для молодих учених біотехнологів, ІТ-технологів, бізнесменів і менеджерів сільськогосподарських підприємств, що розробляють і виробляють екологічно безпечну продукцію для дітей, гірників, металургів, що мешкають на території з техногенним тиском;



- створення комплексної системи цифрового моделювання і моніторингу забруднення води і повітря, території з техногенним забрудненням, медичного обслуговування і харчування людей, що працюють і мешкають на забрудненій території;

- оцінка концепцій: *SMART*-енергоефективність, *SMART*-ремонт, *SMART*-екологія з моделюванням колективних рішень, щодо впровадження штучного інтелекту(ШІ), ІТ-комунікацій, біотехнологій, технологій цифрової економіки в харчову промисловість та АПК.

### 15.3. Загальні принципи побудови *SMART*-підприємств харчової промисловості

На рис. 15.6. наведено схему смарт-підприємства харчової промисловості з «розумною» фабрикою виробництва продуктів здорового харчування для гірників, металургів, хіміків, дітей, воїнів ЗСУ і населення, що проживає на території регіонів з техногенним навантаженням.

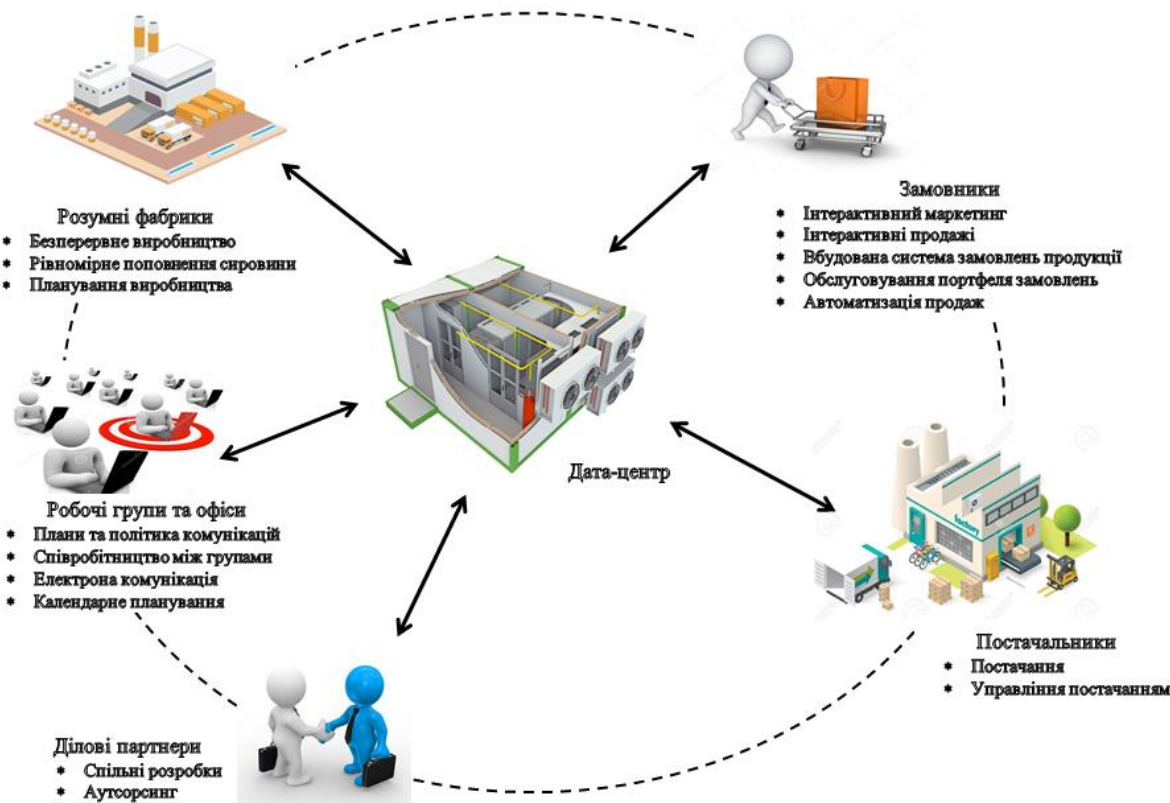


Рисунок 15.6. – Смарт-підприємство харчової промисловості 2030 року

Таким чином, ряд методів керування об'єктами виробництва смарт-продуктів харчування, зв'язаних з використанням знань в процесі управління виробництвом інноваційної продукції, виокремимо в окрему групу, яку будемо називати інтелектуальним управлінням.

До такого управління необхідно віднести наступні технології:

-на основі експертних систем;

- які використовують математику нечітких множин( фазі-регулятори);
- які використовують нейромережеві структури;
- які використовують асоціативну пам'ять;
- які використовують сполучення наведених вище технологій,наприклад, нейромережевих фазі-регуляторів та безпошукових адаптивних регуляторів.

**В системах інтелектуального управління смарт-підприємствами, РТК побудованих з використанням штучних нейронних мереж (ШНМ) важливу роль відіграють нейрокомп'ютери та експертні системи.**

Штучні нейронні мережі є деяким аналогом біологічних нейромереж, але в управлінні використовують мережі з іншими властивостями, а саме:

- масовий спосіб паралельного оброблення інформації;
- розподілене уявлення інформації;
- властивість до навчання та узагальнення;
- адаптивність;
- властивість контекстуальної обробки інформації;
- толерантність до помилок;
- низький рівень енергоспоживання.

#### **Завдання штучних нейронних мереж**

1. Апроксимація функцій.
2. Моделювання процесів і станів.
3. Ідентифікація об'єктів.
4. Прогнозування подій.
5. Управління об'єктами.
6. Розпізнавання образів.
7. Аналіз даних (наприклад, обробка відео зображень, обробка акустичних сигналів, оцінка достовірності).
8. Стиснення даних.
9. Робота з асоціативною пам'яттю.
10. Категоризація (кластеризація) об'єктів.
11. Оптимізація.
12. Штучний інтелект в широкому розумінні проєктних рішень, щодо розробки систем управління виробництвом смарт-продуктів харчування.

Отже, розроблено основи теорії проєктування смарт-продуктів харчування в умовах автоматизованого виробничого процесу на заводах з виробництва хлібомакаронних виробів.

Доведено, що проблему забезпечення смарт-продуктами харчування регіонів з техногенним забрудненням необхідно вирішувати шляхом впровадження високих технологій та робототехнологічних комплексів з використанням біотехнологій та інформаційних технологій.

Розширення асортименту хлібобулочних продуктів та макаронних виробів з лікувальними характеристиками та підвищеним вмістом тваринного білка і життєвоважливих нутрієнтів для гірників, воїнів ЗСУ, школярів вимагають від

проектантів безлюдних технологій проектних рішень щодо розробки робототехнологічних інтенсифікаторів у комплексі з АСУТП виробництва смарт-продуктів.

Запропоновано цифрову платформу «ІЖА» з інформаційною системою траекторного керування виробництвом смарт-продуктів та алгоритми їх проектування. У розробленій цифровій платформі «ІЖА» важливими моделями є показники ступеня збалансованості макро- мікроелементного та вітамінного складу полі компонентних продуктів харчування гірника, школяра та воїна ЗСУ. Знання про еталонний продукт харчування формуються в базах прецедентів, базах знань і фреймах, що дозволяє управляти життєвим циклом хлібобулочних та макаронних виробів за допомогою GALS- технологій та PDM-систем.

Розроблено ієрархію автоматизованих систем управління підприємствами харчової промисловості з хмарними технологіями та інтелектуальними системами підтримки прийняття рішень.

### **Контрольні запитання**

1. Навести основні завдання оптимізації технологічних процесів.
2. Як здійснити вибір системи підтримки інтелектуальних рішень в АСУ підприємством харчової промисловості ?
3. Який закон регулювання застосовується під час автоматизації процесу?
4. Назвіть інформаційні функції АСУ.
5. Які недоліки мають централізовані АСУТП?
6. Назвіть шляхи розвитку АСУТП.
7. Поясніть функції технолога-оператора АРМ.
8. Поясніть завдання штучних нейронних мереж
9. За яким принципом будуть працювати смарт-підприємства харчової промисловості 2030 року?

## ЧАСТИНА 4. АДАПТИВНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

### Тема 16. Алгоритмізація виробничих процесів харчових технологій.

16.1. Ідентифікація складних технологічних процесів у харчовій промисловості.

На рис. 16.1. наведена блок-схема керування типовим об'єктом виробництва хлібобулочних виробів. Об'єкт у загальному вигляді опишемо виразом виду  $W_{об} = \frac{K_{об} * e^{-\tau p}}{1 + \tau p}$ . Керувати об'єктом будемо за допомогою пропорційно-інтегрального регулятора з введенням в закон регулювання інтеграла:

$$U_{пи}(t) = K_{п}[E(t) + K_i \int_0^t E(t) dt] \quad (16.1)$$

а також пропорційного регулятора з введенням в закон регулювання інтеграла і похідної від регульованої величини (ПІД – регулятор):

$$U_{пид}(t) = K_n[E(t) + K_I \int_0^t E(t) dt + K_D E(t)] \quad (16.2),$$

де  $E(t) = Y_z(t) - Y(t)$ ; де  $Y(t)$  – вихідна змінна об'єкта керування;  $Y_z(t)$  – завдання на регулятор;  $U(t)$  – вихідна змінна регулятора;  $K_n, K_I, K_D$  налагоджувальні параметри регулятора.

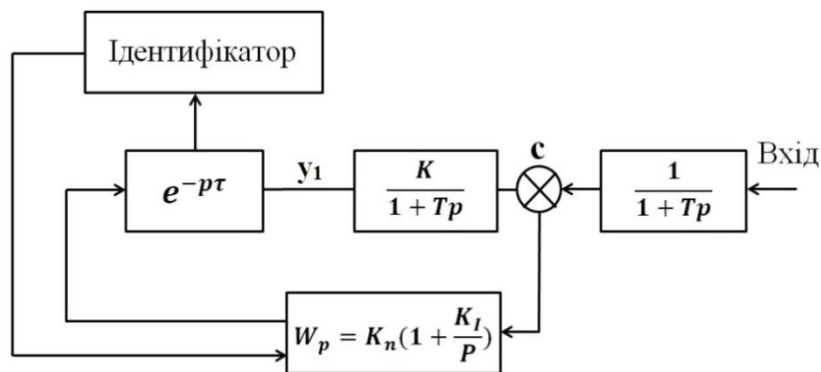
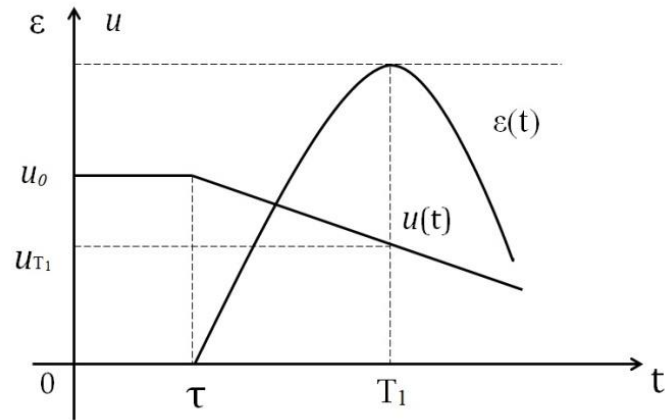


Рисунок 16.1. – Блок-схема керування об'єктом переробки борошна в хлібобулочні вироби

В цій системі активна ідентифікація характеристик виконується шляхом періодичного додавання ідентифікованого впливу  $\Delta U$  до управлінського впливу  $U_{пи}(t)$ ,  $U_{пид}(t)$ . Частота подання ідентифікованого впливу визначається динамічними параметрами системи. До моменту приходу наступного ідентифікованого впливу повинен повністю закінчитися перехідний процес від попереднього, не виходячи із зони допустимих відхилень. Чим менша ймовірність можливих змін параметрів об'єкту, тим рідше проводиться ідентифікація. З метою одержання математичних моделей параметрів об'єкту, розглянемо детально рис. 16.2.

У процесі ідентифікації визначається час коли досягається максимальне значення функції  $Y(t)$ . Цей час визначає величину запізнення  $\tau$ . Позначимо  $A_1$  значення  $Y(t)$ , яке відповідає цьому часу. Час досягнення максимального значення  $Y(t)$  функцією позначимо через  $T_1$ . Одночасно будемо фіксувати значення, управлінського впливу в момент часу, який передує моменту  $T_1$  на постійне значення  $\tau$ .



**Рисунок 16.2.** – Залежність змінних  $\varepsilon, u$  від часу  $t$

Використовуючи результати аналізу функцій  $Y(t)$ ,  $Y'(t)$ ,  $U(t)$ , виконаємо розрахунок параметрів об'єкту за формулою:

$$K_o = \frac{Y_D}{U(T_1 - \tau)}, T = \frac{K_o \Delta U}{A_1}, \quad (16.3)$$

Де  $\Delta U$  – ідентифікуючий вплив, який додано до управляючого впливу. На основі обчислених параметрів об'єкту стає можливим синтез оптимальної системи управління за критерієм максимальної ступені стійкості. Вона має максимальну швидкість дії при аперіодичному характеру перехідного процесу.

Для системи регулювання об'єктом виду  $W = K_o \exp(-\tau p)(1 + Tp)^{-1}$  з використанням ПІ – регулятора оптимальні за критерієм максимальної ступені стійкості настроєні параметри регулятора, будемо визначати за формулою:

$$K_{II} = A(\alpha\tau - 2)(\tau K_o)^{-1}; KI = A[(2(\alpha\tau - 3)(\tau)^{-1} - (\alpha\tau - 2)\lambda_{III}] [\tau K_o]^{-1},$$

$$\text{де } \lambda_{III} = [\sqrt{8T^2 + \tau^2} - (4T + \tau)](2T\lambda)^{-1},$$

$$A_M = T e^{\lambda_{III}\tau}, \alpha = \sqrt{8T^2 + \tau^2} (\tau T)^{-1} \quad (16.4)$$

При використуванні ПІД – регулятора його оптимальні настроювальні параметри визначаються за формулами:

$$K_{II} = A[(2 - \alpha\tau)\lambda_{III} + 2(\alpha\tau - 3)\tau^{-1}]K_{об}^{-1},$$

$$KI = A[0,5(\alpha\tau - 2)\lambda_{III}^2 - 2(\alpha\tau - 3)\lambda_{III}\tau^{-1} + 3(\alpha\tau - 4)\tau^{-2}]K_{об}^{-1},$$

$$K_D = A(\alpha\tau - 2)K_{об}^{-1}, \text{ де } \lambda_{III} = \frac{(12T^2 + \tau^2)^{0,5} - (6T + \tau)}{2\tau T}, \quad A = T \exp \lambda_{III}\tau,$$

$$\alpha = (12T^2 + \tau)^{0,5} (\tau T)^{-1} \quad (16.5)$$

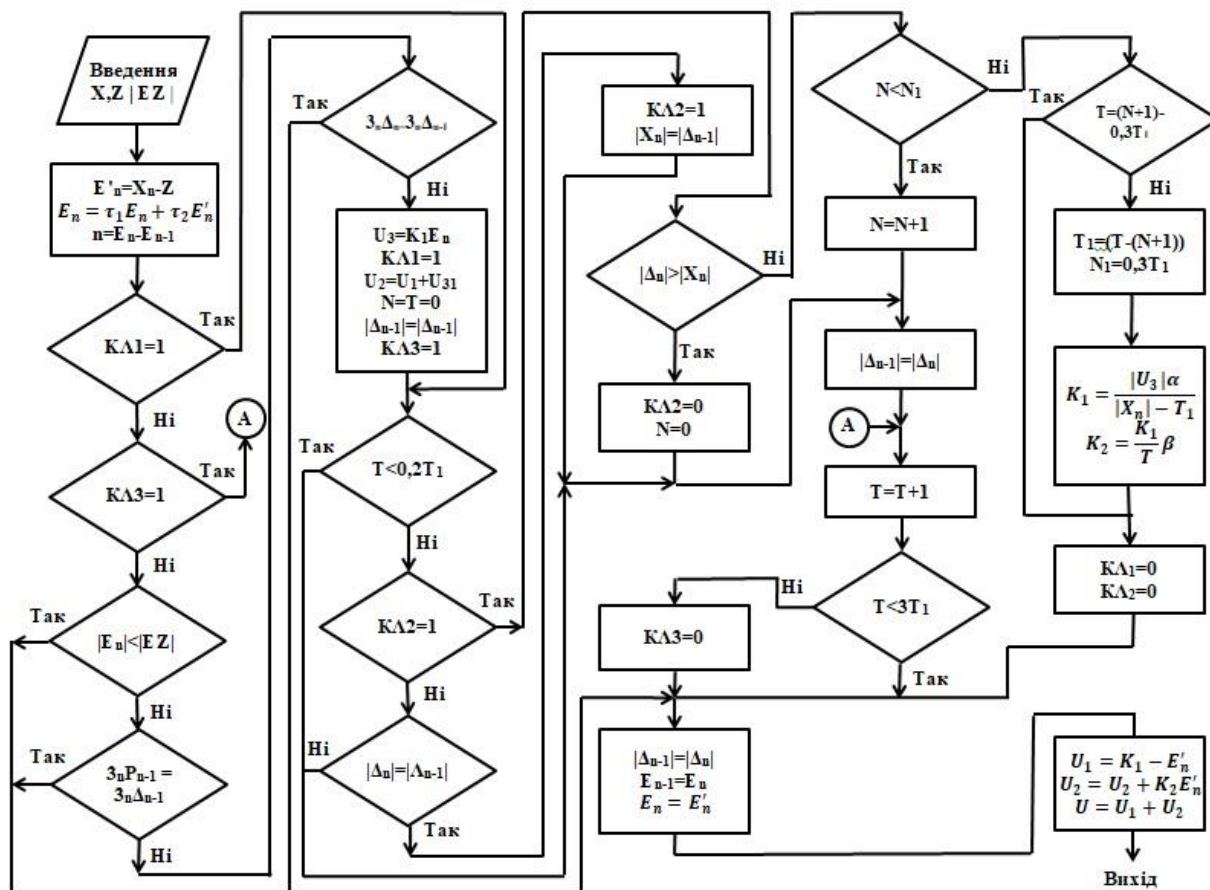
Розглянемо детально роботу адаптивного управління з активною ідентифікацією. Широке використання мікропроцесорів (МП) на підприємствах харчової промисловості в розподілених системах управління виробництва

продукції відкриває нові можливості щодо розробки адаптивних алгоритмів управління, а також адаптивних цифрових регуляторів. Вони дозволяють реалізувати більш складну логіку керування технологічним процесом і запам'ятовувати в оперативній пам'яті необхідні проміжні параметри.

На рис.16. 3 представлено блок – схему адаптивного алгоритму з активною ідентифікацією. Алгоритм має наступні функціональні блоки: фільтр, блок аналізу траєкторії, блок запуску ідентифікатора, блок пошуку максимуму, блок перерахунку коефіцієнтів, ПІ – регулятор.

Розглянемо роботу адаптивного цифрового алгоритму: 1. Введемо значення регульованої величини  $Y$  і завдання  $uz$ ; 2. Визначимо помилки регулювання: 3. Виконуємо первинне згладжування і визначимо відфільтрований вхідний сигнал  $EF$  за допомогою рівняння:  $EPS = Y - \Delta Z$   
 $EF = TP * EFP + TP1 * EPS$ , де  $TFi$   $TF_1$  – параметри, які необхідно налагодити. 4. Оцінюємо похідну помилку  $DE = (EF - EFP)$ , в якості якої вибираємо першу різницю, так як ця величина використовується лише для визначення моменту  $t_0 = t_y$  переходу фазової траєкторії через вісь  $E$ . 5. Оцінюємо положення системи на фазовій площині  $(E, \dot{E})$ . В момент  $t_0$  починається процес ідентифікації, а відповідно на вхід регулятора подається скачок і відключається аналіз траєкторії. 6. Через час  $0,2T_1$ , де  $T_1$  – оцінка динаміки об'єкта, розпочинається за видозахищений (перешкодо – захищений) пошук максимуму величини  $(E(t))$  7. В момент досягнення максимуму будемо оцінювати динаміку об'єкта  $T_1$ , шляхом перерахунку коефіцієнтів  $K_P, K_I$  регулятора. При цьому автоматично переводяться ключі в початкове положення, які керують логікою алгоритму.

8. Виробляється ПІ – управління та запам'ятовується інформація, яка необхідна для наступного такту.



**Рисунок 16.3. – Адаптивний регулятор**

Первинне згладжування, оцінка похідної і відпрацювання ПІ – керування виконується в кожному такті роботи алгоритму. Аналіз траєкторії, ідентифікація і перерахунок коефіцієнтів виконується у відповідності з внутрішньою логікою алгоритму. Розроблений алгоритм адаптації з активною ідентифікацією використано в способах і системах керування технологічними операціями виробництва хліба, а саме стадіями опара- тісто - випікання[1, 3, 4, 13].

Його випробовування в умовах виробництва хлібобулочних виробів підтвердило високу ефективність систем керування процесами підготовки стадій опара- тісто, випікання.

В системах керування процесами виробництва продуктів харчування широке розповсюдження на криворізьких хлібозаводах та інших підприємств одержали системи стабілізації параметрів завантаження, густини тіста, витрат води, газу та електрики Точність таких систем щодо вихідних показників складає 7–10%, а відповідно не забезпечує заданої якості продукції, яка надходить споживачам. Тому виникає завдання щодо розробки цифрових адаптивних алгоритмів стабілізації вихідних параметрів об’єкту переробки сировини (борошна) в продукцію з лікувально- профілактичними властивостями.

Ці алгоритми реалізуються за допомогою сучасних мікропроцесорних систем (МП), які працюють в якості ідентифікаторів і забезпечують

автоматичне квазіоптимальне налагодження систем. Передавальна функція системи керування стабілізації регулюємого параметру (густини тіста,) може бути записано у вигляді рівняння:

$$W_{cucm}(P) = \frac{W_{pez}(P) * W_{ob}(p)}{W_{pez}(P) * W_{ob}(P) + 1} \quad (16.6)$$

При цьому об'єкт регулювання опишемо:

$$W_{ob}(P) = \frac{K_D E^{-p\tau}}{T_p + 1} = \frac{E^{-p\tau}}{\frac{T}{K_0} * p + 1 / K_0} = \frac{E^{-p\tau}}{a_1 p + a_0} \quad (16.7)$$

де  $a_1 = T/K_0$ ,  $a_0 = 1/K_0$  – коефіцієнти.

Після підстановки в рівняння (16.6) виразу (16.7) одержимо:

$$W_{cucm}(P) = \frac{(K_{II}(P) + K_I) e^{-\tau p}}{p(a_1 p + a_0) + (K_{II} p + K_I) e^{-\tau p}} \quad (16.8)$$

Якщо подати на вхід системи стрибок  $q(t)$  передавальну функцію (16.8) запишемо:

$$W(p) = \int_0^{\infty} q(t) e^{-pt} dt = \int_0^{\infty} q(t) \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i}{i!} p^i (t)^i dt = \sum_{i=0}^{\infty} (-1)^i p^i \int_0^{\infty} a(t) t^i \frac{1}{i!} dt = \sum_{i=0}^{\infty} (-1)^i p^i \mu_i \quad (16.9)$$

де  $\mu_i = \int_0^{\infty} q(t) \frac{t^i}{i!} dt$  – момент функції.

Ряд у виразі (16.8) одержано в результаті розкладу  $e^{-pt}$  в ряд  $\sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i (p\tau)^i}{i!}$  та зміною порядку операції сумування та інтегрування, що допустимо внаслідок розмірної збіжності степеневого ряду. Порівняємо вирази (9) та (8), а також замінюючи  $e^{-pt}$  рядом одержимо:

$$\sum_{i=0}^{\infty} (-1)^i p^i \mu_i [a_1 p^2 + a_1 p + (K_{II} p + K_I) \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^j}{j!} \tau^j p^j] = (K_{II} p + K_I) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!} \tau^k p^k \quad (16.10)$$

Порівнюючи в лівій і правій частинах коефіцієнти при одних і тих ступенях  $p$ , одержимо систему рівняння виду:

$$\mu_0 a_0 + \mu_0 k_{II} + K_I \mu_1 (-1)^1 + \mu_0 K_I (-1)^1 \tau = K_{II} + K_I (-1)^1 \tau \quad (16.11)$$

для першого ступеня  $p$ .

$$\mu_0 a_1 + (-1)^1 \mu_1 a_0 + (-1)^1 \mu_1 K_{II} + \mu_0 K_{II} (-1)^1 \tau + K_I \mu_2 + \mu_1 \tau K_I + \frac{1}{2} \mu_0 K_I \tau^2 = (-1)^1 \tau K_{II} + \frac{K_I}{2} \tau^2 \quad (16.12)$$

для другого ступеня  $p$

$$\begin{aligned} & (-1)^2 \mu_1 a_1 + (-1)^2 \mu_2 a_0 + (-1)^1 \mu_1 K_{II} \tau + \mu_2 K_{II} p + \frac{1}{2} \mu_0 K_{II} \tau^2 + (-1)^2 K_I \mu_3 + (-1)^2 \mu_2 \tau K_I + \\ & + (-1)^2 \mu_2 K_I (-1) \tau + (-1)^1 \mu_1 K_I \frac{1}{2} \tau^2 + \frac{1}{6} \mu_0 K_I \tau^3 = \frac{1}{2} K_{II} \tau^2 + \frac{1}{6} K_I (-1)^3 \tau^3 \end{aligned} \quad (16.13)$$

для третього ступеня.

Обчислюємо рівняння (16.13) відносно  $a_0$  і одержимо:

$$a_0 = \mu_1 K_{II} K_I + K_I \tau + \frac{K_{II}}{\mu_0} - \frac{K_I \tau}{\mu_0} \quad (16.14)$$



Обчислюємо рівняння (16.14) відносно  $a_1$  і підставимо замість  $a_0$  його значення та одержимо квадратичне рівняння виду:

$$a_1 = \frac{\mu_1}{\mu_0} \left( \mu_1 K_{II} K_I + K_I \tau + \frac{K_{II}}{\mu_0} - \frac{K_I \tau}{\mu_0} \right) + K_{II} \tau + \frac{\mu_1}{\mu_0} K_{II} - \frac{1}{2} K_I \tau^2 - \frac{\mu_1}{\mu_0} K_I \tau - \frac{\mu_2}{\mu_0} K_I - \frac{K_{II}}{\mu_0} \tau + \frac{1}{2\mu_0} K_I \tau^2 \quad (16.15)$$

Підставляючи  $a_0$  і  $a_1$  в рівняння (16.15) одержимо кубічне рівняння:

$$\begin{aligned} & \frac{\mu_1}{\mu_0} K_I \tau - \frac{\mu_1^2}{\mu_0^2} K_I \tau + 2\mu_1 K_{II} \tau - \frac{\mu_1^2}{\mu_0} K_I \tau - \frac{\mu_1}{\mu_0} K_{II} \tau + \mu_2 K_{II} \tau - \frac{\mu_2}{\mu_0} K_I \tau - \mu_2 K_{II} \tau - \frac{1}{2} \mu_1 K_I \tau^2 + \frac{1\mu_1}{2\mu_0} K_I \tau^2 + \\ & + \frac{1}{2} \mu_0 K_{II} \tau^2 - \frac{1}{2} \mu_1 K_I \tau^2 + \frac{1}{2} K_{II} \tau^2 - \frac{1}{6} \mu_0 K_I \tau^3 + \frac{1}{6} K_I \tau^3 + \frac{\mu_1}{\mu_0} K_{II} K_I + \frac{\mu_1^2}{\mu_0} K_{II} + \frac{\mu_1^2}{\mu_0} K_{II} - \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_0} K_I + \\ & + \mu_1 \mu_2 \tau^3 + \frac{\mu_1}{\mu_0} K_{II} K_I + \frac{\mu_1^2}{\mu_0} K_{II} + \frac{\mu_1^2}{\mu_0} K_{II} - \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_0} K_I + \mu_1 \mu_2 K_{II} K_I + \frac{\mu_2}{\mu_0} K_{II} + \mu_0 K_{II} + \mu_3 K_I = 0 \end{aligned} \quad (16.16)$$

За умовою ідентифікації процесу виробництва хлібобулочних виробів межі знаходження кореня  $\tau_{\min} \leq \tau < \tau_{\max}$ , то ці рівняння легко обчислюються методом Бісекції (золотого перетину) [1,65]. Розрахований корінь  $\tau^*$  буде значенням часу запізнення. Після чого, підставляючи  $\tau_1^*$  в рівняння (16.14, 16.15) одержимо відповідно значення  $a_0^*$  і  $a_1^*$ .

В системі, в якості блока ідентифікації використано МП, який виконує наступні функції:

1. Видає сигнал щодо введення сигналу в систему керування (фіксує момент подачі скачка).

2. Вводить в пам'ять значення імпульсної перехідної функції в момент  $t$ .

3. Обчислює моменти за формулою:

$$\mu_i = \sum_{j=0}^N q(t_j) t_j^i \frac{1}{i!} (t_j - t_{j-1}) \quad (16.17)$$

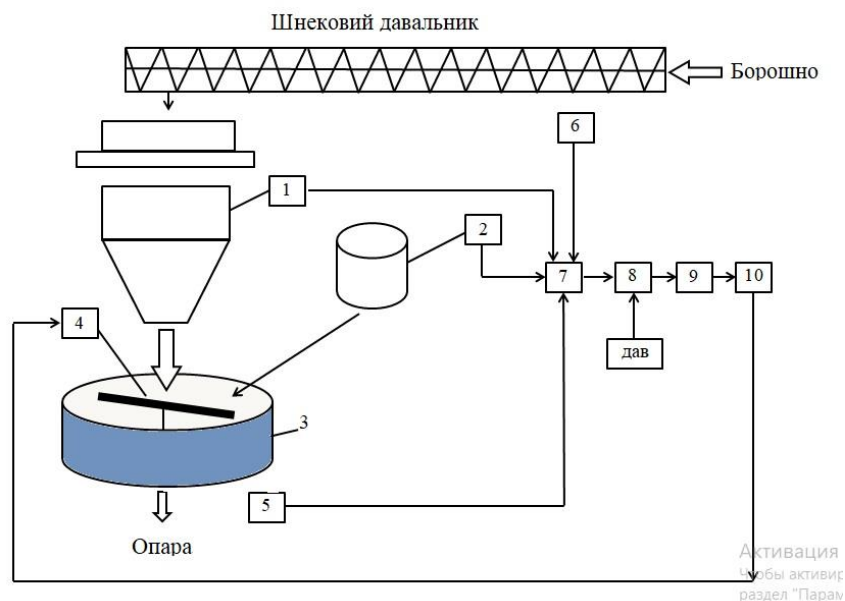
4. Обчислює рівняння (16.17) методом Бісекції

5. Визначає  $\tau^*$ ,  $a_0^*$ ,  $a_1^*$

6. Перераховує  $K_0, T$ .

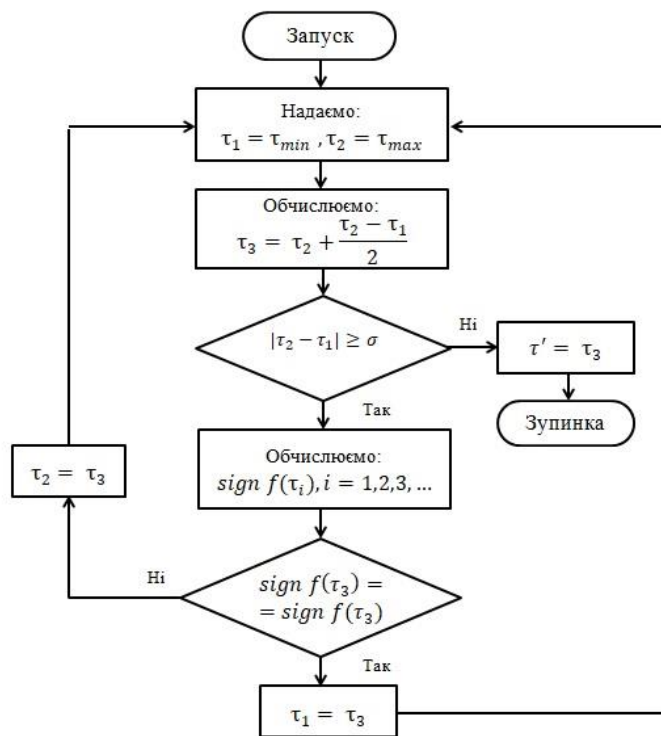
7. За методом максимального ступеня стійкості корегує коефіцієнти  $K_{II}$  і  $K_I$ . Блок-схема обчислення кореня  $\tau^*$  в рівнянні (16), за умови того, що корінь знаходиться в межах  $\tau_{\min} \leq \tau < \tau_{\max}$  а потрібна точність визначається числом  $\delta$ , представлена на рис.16. 5. В розробленій схемі керування виробництвом опари. якість опари та борошна контролюється цифровими датчиками 5, 6, Ці сигнали з цифрових датчиків 1,2,5,6, надходять на пристрій введення МП – 7.

На рис. 16.4 представлено блок-схему керування виробництвом опари [1].



**Рисунок 16.4.** – Блок схема керування процесом виробництва опари:  
**1** – автоборошномірний пристрій; **2** – автоматичний водомірний пристрій;  
**3** – тістомісильна машина; **4** – двигун мішалки; **5** – датчик якості опари;  
**6** – датчик якості борошна; **7** – МП; блоки **8, 9, 10** – система завантаження тістомісильної машини **3**.

Мікропроцесор, виконуючи вищезазвані функції алгоритму керування, переналагоджує коефіцієнти  $K_I$  та  $K_D$  ПІ – регулятора, який керує системою завантаження тістомісильної машини (блоки 4,8,9,10).



**Рисунок 16.5.** – Блок-схема розрахунку кореня

Об'єкт керування за каналом «витрати води в лінію переробка борошна – густина тіста» опишемо рівнянням другого порядку з запізненням:

$$W_{об}(p) = \frac{e^{-p\tau}}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0} \quad (16.18)$$

Тоді

$$\sum_{i=0}^{\infty} (-1)^i p^i \mu_i [a_2 p^3 + a_1 p^2 + a_0 p + (K_{II} p + K_I)] * \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^j}{j!} \tau^j p^j = (K_{II} p + K_I) * \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!} \tau^k p^k \quad (16.19)$$

Використовуючи метод, який наведено вище, при однакових ступенях одержимо систему рівнянь виду:

$$\mu_0 a_0 + \mu_0 K_{II} - \mu_0 K_{II} \tau - \mu_1 K_I = K_{II} - K_I \tau \quad (16.20)$$

$$\mu_0 a_1 - \mu_1 a_1 - \mu_1 K_{II} - \mu_0 K_{II} \tau + \mu_2 K_I + \mu_1 K_I \tau + \frac{1}{2} K_I \tau^2 = -\tau K_{II} + \frac{1}{2} K_I \tau^2 \quad (16.21)$$

$$\begin{aligned} \mu_0 a_2 - \mu_1 a_1 - \mu_2 a_2 + \frac{1}{2} \mu_0 K_{II} \tau^2 + \mu_1 K_{II} \tau + \mu_2 K_{II} - \frac{1}{6} \mu_0 K_I \tau^3 - \frac{1}{2} \mu_0 K_I \tau^3 - \frac{1}{2} \mu_1 K_I \tau^2 - \mu_2 K_I \tau - \mu_3 K_I = \\ = \frac{1}{2} K_{II} \tau^2 - \frac{1}{6} K_I \tau^3 \end{aligned} \quad (16.22)$$

Обчислюючи ці рівняння і підставляючи значення  $a_0, a_1, a_2$  одержимо рівняння четвертого ступеня

$$a_0 = \frac{K_{II}}{\mu_0} - \frac{K_I \tau}{\mu_0} - K_{II} - K_I \tau - \frac{\mu_1}{\mu_0} K_I \quad (16.23)$$

$$a_1 = \mu_1 \left( \frac{K_{II}}{\mu_1} - \frac{K_I}{\mu_0} \tau - K_{II} + K_I \tau - \frac{\mu_1}{\mu_0} K_I \right) + \frac{\mu_1}{\mu_0} K_{II} + K_{II} \tau - \frac{\mu_2}{\mu_0} K_I - \frac{\mu_1}{\mu_0} K_I \tau - \frac{1}{2} K_I \tau^2 - \tau \frac{K_{II}}{\mu_0} + \frac{1}{2} \mu_0 K_I \tau^2 \quad (16.24)$$

$$\begin{aligned} a_2 = \frac{\mu_1}{\mu_0} \left[ \mu_1 \left( \frac{K_{II}}{\mu_0} - \frac{K_I}{\mu_0} \tau - K_{II} + K_{II} \tau - \frac{\mu_1}{\mu_0} K_I \right) + K_{II} \tau - \frac{\mu_2}{\mu_0} K_{II} - \frac{\mu_1}{\mu_0} K_I \tau - \frac{1}{2} K_I \tau^2 - \tau \frac{K_{II}}{\mu_0} + \frac{1}{2} \mu_0 K_I \tau^2 \right] + \\ + \frac{\mu_2}{\mu_0} \left[ \frac{K_{II}}{\mu_0} - \frac{K_I}{\mu_0} \tau - K_{II} + K_I \tau - \frac{\mu_1}{\mu_0} K_I \right] - \frac{1}{2} K_{II} \tau^2 - \frac{\mu_1}{\mu_0} K_{II} \tau - \frac{\mu_2}{\mu_0} K_{II} + \frac{1}{6} K_{II} \tau^3 + \frac{1}{2} \frac{\mu_1}{\mu_0} K_I \tau^2 + \frac{\mu_2}{\mu_0} K_I \tau + \\ \frac{\mu_3}{\mu_0} K_{II} - \frac{1}{2} \mu_0 K_{II} \tau^3 - \frac{1}{6} K_I \tau^3 \end{aligned} \quad (16.25)$$

$$\begin{aligned} \frac{\mu_1}{\mu_2} K_I \left( \frac{\mu_4 \mu_0}{\mu_1} - \frac{\mu_2^2}{\mu_1} - \mu_2 \mu_1 - 2 \mu_3 - \frac{\mu_1^3}{\mu_0} \right) + \mu_1 \frac{\mu_1}{\mu_0^2} K_{II} * [(2 \mu_0 - 1 - \mu_0^2)] + \frac{K_{II}}{\mu_0} [(-\mu_3 - \mu_1^3) + \frac{1}{\mu_0}] + \\ + \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_0} K_I \tau \left( \frac{1}{\mu_0} (1 + \frac{\mu_1^2}{\mu_2}) - 4 + \mu_0 + \frac{\mu_3}{\mu_1 \mu_2} \right) + \frac{K_{II} \tau}{\mu_0^2 (\mu_1^2 - \mu_2 \mu_0)} + \frac{\tau^2}{2 \mu_0 (\mu_2 K_I - \frac{\mu_1^2}{\mu_0} K_I + \mu_1 K_{II})} + \\ + \frac{\mu_1}{6 K_I \tau^3} * \left( \frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_0} - 1 \right) + \frac{1}{6} K_{II} \tau^3 (1 - \mu_0) - \frac{\tau^4}{24} (\mu_0 - K_U) = 0 \end{aligned} \quad (16.26)$$

Рівняння (16.26) також, як і раніш будемо обчислювати методом Бісекції, а визначений корінь  $\tau_2^*$  буде відповідати значенню часу запізнення  $\tau$ . Підставляючи  $\tau_2^*$  в рівняння (16.20, 16.21, 16.22) одержимо параметри  $a_0, a_1, a_2$ .

Блок – схема адаптивної цифрової системи керування тістомісильного відділення (технологічні апарати 1,2, 3,4,5,6,7,8) наведена на рис 16.6.

Ця система працює в циклі з робототехнологічним комплексом

виробництва тістових напівфабрикатів 8. та робототехнічної системи замороження 9 хліба 10 Якість борошна та опари в системі керування вимірюється інтелектуальним датчиком Д1 склад тіста (запах) – датчиком Д2. Цифрові сигнали з інтелектуальних датчиків Д1, Д2, Д3, Д4, надходять на пристрій введення (ПВВ) МП 1, який в подальшому розраховує коефіцієнти  $a_0, a_1, a_2$ , а також чинники  $K_0, T$ . За методом максимальної ступені стійкості МП розраховує також коефіцієнти  $K_{II}$  і  $K_I$ . ПП – регуляторів Р1, Р2. Регулятор Р1 відпрацьовує сигнал керування, який за допомогою тристороннього перетворювача ТПЧ1 і двигуна АД1 змінює продуктивність агрегату Н щодо транспортування опари в тістомісильну машину 5. Система адаптивного керування мішалкою 6 з регулятором Р2 та виконавчими механізмами ВМ1, ТПЧ2, АД2 керує продуктивністю апаратів 5 та 7.

Така система цифрового керування комплексу дозволяє збільшити продуктивність стадії випікання хліба на 6-7% [5]. В останні п'ять років у процесі виконання портфеля замовлення ОПР та топ-менеджери хлібозаводів, які працюють на стадію замороження хліба стикаються з високими вимогами споживачів до їх продукції. В цьому випадку виникає необхідність розробки цифрових алгоритмів управління процесом виробництва заморожених сортів хліба з контролем вхідних і вихідних змінних за допомогою інтелектуальних датчиків Д3, Д4, Д5.

Нехай за інформацією інтелектуальних датчиків на хлібозаводах контролюються вхідні  $x(t)$  і вихідні  $y(t)$  чинники. Роботу тістомісильних агрегатів будемо контролювати за наступними каналами: а) сила борошна та якість інгредієнтів і закваски [1,13]. б) процентний вміст густини тіста та його запах в зливні тістомісильної машини; в) питома вага борошна і питома вага опари в стадіях виробництва тіста. Динаміку цих агрегатів опишемо лінійним диференціальним рівнянням виду:

$$\sum_{i=0}^n a_i y^i(t) = x(t - \tau), \quad (16.27)$$

де  $x(t)$  та  $y(t)$  – вхідний та вихідний сигнали об'єкту досліджень;  $a_i$  ( $i=0,1,2,\dots,n$ ),  $\tau$  – квазістаціонарні параметри об'єкту, при цьому  $a_i$  - параметри ідентифікації [1,6,11,15]. Параметри  $a_i, \tau$  приймають значення із діапазону

$$a_{i \min} \leq a_i \leq a_{i \max}, \quad i=0,1,\dots,n, \quad 0 \leq \tau \leq \tau_{\max} \quad (16.28)$$

За сигналами  $x(t)$  та  $y(t)$ , які ми можемо вимірювати, необхідно визначити поточні значення параметрів  $a_i$  і  $\tau$  ( $i=0,1,\dots, n$ ). Для об'єкта, який працює в замкненому контурі з регулятором, коли вхідний сигнал має достатньо широкий частотний спектр (має безперервну спектральну щільність) пропонується наступний спосіб пасивної ідентифікації. Вхідний і вихідний сигнали об'єкту пропускають через ряд лінійних фільтрів  $N=n+2$  порядку  $K \square N$  з передавальними функціями  $W_i(p)$ .

Будемо вважати, що  $L^{-1}[W_i(p)]$  лінійно незалежні, де  $L^{-1}[1,6]$  - означає зворотне перетворення Лапласа. Тоді запишемо:

$$L^{-1}[W_L(p)] \neq \sum_{j=1}^N C_j L^{-2}[W_j(p)], i \neq j \quad (16.29)$$

У результаті такої операції одержимо матрицю  $y(t)$  і вектор  $\bar{X}(t-\theta)$

$$y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t), & y_1'(t), & \dots, & y_1^{(n-1)}(t) \\ y_2(t), & y_2'(t), & \dots, & y_2^{(n-2)}(t) \\ \dots & \dots & \dots, & \dots \\ y_{n+2}^1(t), & y_{n+2}^2(t), & \dots, & y_{n+2}^{(n+2)}(t) \end{bmatrix}, \quad (16.30)$$

$$\text{Де } \bar{X}(t-\theta) = (x_1(t-\theta), \dots, x_N(t-\theta)), \quad (16.31)$$

$$y'(t) = L^{-1}[p^i W_i(p) y(p)], \quad 0 < \theta < \tau_{\max}$$

$$x_j(t) = L^{-1}[W_j(p) x(p)], \quad i=0, \dots, n, \quad j=1, \dots, (n+2)$$

$x(p)$ ,  $y(p)$  – зображення по Лапласу вхідного і вихідного сигналу об'єкту, який будемо описувати рівнянням виду (16.27). Доведемо, що одержані таким чином сигнали підкоряються системі тотожностей.

$$\sum_{i=0}^n a_i y_i^{(i)}(t) = x_i(t-\theta), \quad j=1, \dots, N \quad (16.32)$$

$$\text{за умови, що } \theta = \tau \quad (16.33)$$

Дійсно, якщо перейти в рівнянні (16.27) в частотну область, що допустимо внаслідок квазістаціонарності параметрів  $a(i=0, \dots, n)$ ,  $\tau$  та помноживши дві частини на  $W_j(p)$ , одержимо з врахуванням (33) значення виду:

$$a_i w_j(p) * p^i y(p) = w_j(p) X(p) e^{-\theta p} \quad (16.34)$$

Якщо перейти у виразі (16.34) у частотну область і врахувати вираз (16.31), одержимо систему рівностей (16.32). Тому сигнали  $y_j^i(t)$ ,  $X_j(t-\theta)$  будемо використовувати для визначення  $a_i$ ,  $\tau$ ,  $i=0, \dots, n$ . З цією метою введемо вектори

$$\begin{aligned} \bar{b}(t, \theta) &= (b_0(t, \theta), \dots, b_n(t, \theta)) \\ \bar{c}(t, \theta) &= (c_1(t, \theta), \dots, c_n(t, \theta)) \end{aligned} \quad (16.35)$$

Які будемо визначати із співвідношень:

$$b^{-T}(t, \theta) = Y^{-1}(t), \quad G^{-T}(t-\theta), \quad (16.36)$$

$$\text{де } \bar{G}(t-\theta) = (X_1(t-\theta), \dots, X_{n+1}(t-\theta)) \quad (16.37)$$

$$Y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t), & y_1'(t), & \dots, & y_1^{(m)}(t) \\ y_i(t), & y_i^i(t), & \dots, & y_i^n(t) \\ \dots, & \dots, & \dots, & \dots \\ y_n(t), & y_{n+1}^i(t), & \dots, & y_{n+1}^n(t) \end{bmatrix}, \quad (16.38)$$

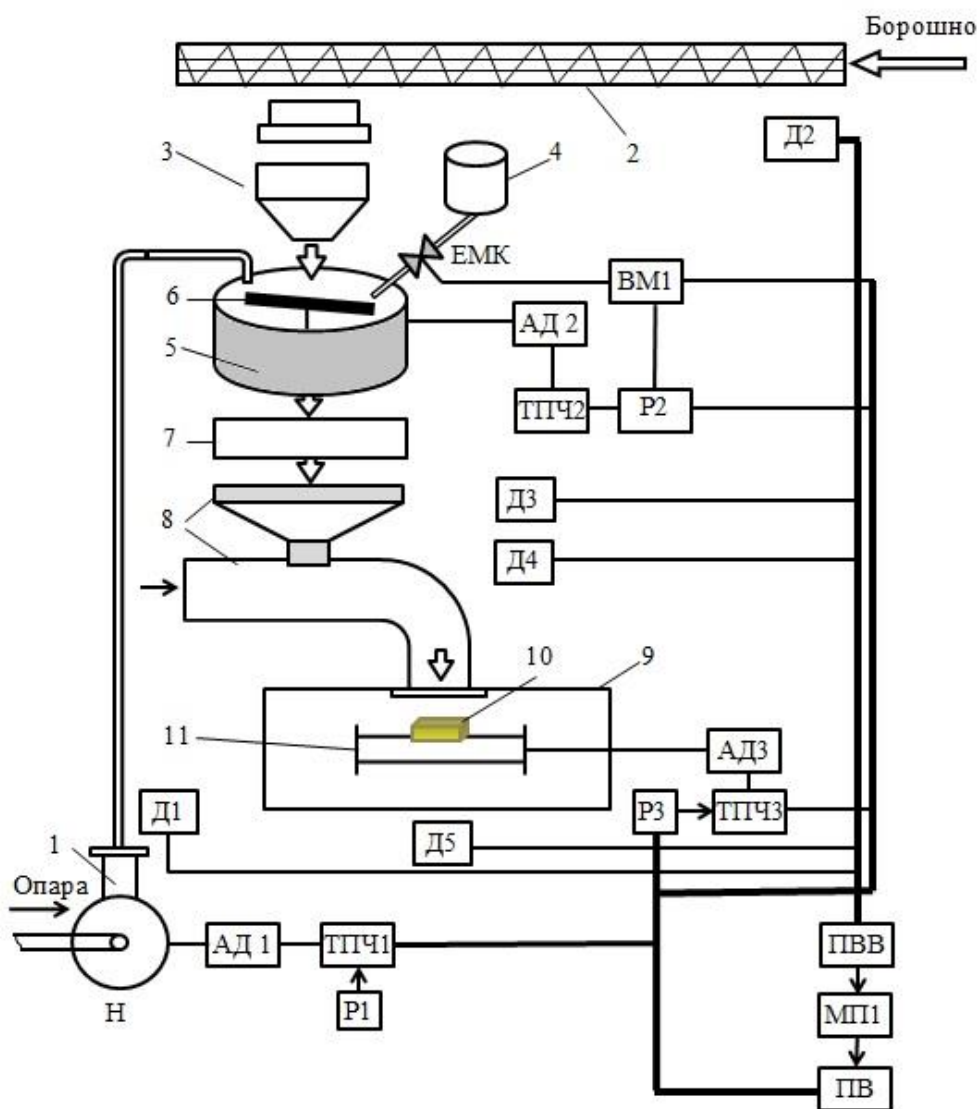
$$c^{-T}(t, \theta) = b^{-T}(t, \theta) - X^{-T}(t-\theta) \quad (16.39)$$

При виконанні умови (16.29)  $\text{rank } y(t) \square n+1$ , а тому  $Y^{-1}(t)$  існує. Як слідує із виразів (16.36 – 16.39)  $(n+1)$  - компонента вектору  $\bar{c}(t, \theta)$  тотожність, яка рівна нулю, а в той же час  $(n+2)$  компонента в загальному випадку відрізняється від нуля. Як слідує із порівнянь виразів (16.32) і (16.36) в момент, коли виконується

умова (16.38)  $\epsilon_{n+2}(t, \theta)$  компоненти вектора  $\bar{\epsilon}(t, \theta)$  обнулюються. При цьому виконується умова:

$$b_j(t_1, \theta) = a_j, j = 0, \dots, n \quad (16.40)$$

Тому оцінки поточних значень параметрів об'єкта можливо одержати із (16.36). Запропонований алгоритм можливо реалізувати на базі МП. Розглянемо приклад використання алгоритму керування в системі автоматичного регулювання процесом замороження напівфабрикатів хліба [7]. Блок-схема такої системи наведена на рис.16.6. В цій системі якісний склад борошна та інгредієнтів контролюється датчиками Д2, Д3, Д4 витрати води автоматичним витратоміром 4 Сигнали з цих інтелектуальних датчиків і блока завдання через ПВВ надходять в МП1.



**Рисунок 16.6. – Адаптивна цифрова система керування тістомісильним відділенням:**

- 1 – насос з електроприводом АД1–ТПЧ1;
- 2 – шнековий давач борошна;
- 3 – автоборошномірний пристрій;
- 4 – автоматичний водомірний бачок;
- 5 – тістомісильна машина;
- 6 – мішалка з електроприводом АД2 – ТПЧ2;
- 7 – п'ятисекційний бункер;
- 8 – робототехнологічний комплекс виробництва;
- 9 – холодильна камера;
- 10 – хліб;
- 11 – конвейер з електроприводом АД3–ТПЧ3.

При цьому за інформацією датчика ДЗ виконується реалізація контура адаптивного регулювання, шляхом зміни подачі води в тістомісильну машину. Алгоритм керування працює наступним чином. Нехай  $T_{KB}$  – інтервал квантування, який визначає дискретність вводу і виводу усіх сигналів у МП. Тоді сигнали із датчиків Д2, Д3, Д4, Д5,  $x_i^j(t), y_i^j(t)$  вводять в МП у дискретні моменти  $\kappa T_{KB}$ ,  $\kappa=0,1,2,\dots,N$ . Величина запізнення апроксимується виразом  $l^* T_{KB}$ , де  $l$  – приймає цілочисельне значення з діапазону:

$$0 \leq l \leq m \quad (16.41)$$

де  $m = \text{ent}[\frac{\tau_{\max}}{T_{KB}}] + 1$  — фіксоване число.

Введені в МП сигнали утворюють матрицю  $Y(\kappa T_{KB})$  та вектор  $\bar{y}_{n+2}(\kappa T_{KB}), \bar{X}(\kappa T_{KB})$ , де

$$\bar{y}_{n+2}(\kappa T_{KB}) = (y_{n+2}(\kappa T_{KB}), y'_{n+2}(\kappa T_{KB}), \dots, y_{n+2}^{(n)}(\kappa T_{KB})) \quad (16.42)$$

$\bar{x}_e(\kappa T_{KB}) = (x_1(\kappa - e)T_{KB}, \dots, x_{n-2}(\kappa - l)T_{KB})$ , де  $l$  – змінюється в межах (16.41).

У процесі ідентифікації обчислюється вектори  $\bar{b}(\kappa T_{KB})$  та  $(n+2)$  компоненти вектора  $\bar{c}(\kappa T_{KB})$ , які є дискретними аналогами виразів (16.36) та (16.37).

$$\bar{b}(\kappa T_{KB}) = Y^{-1}(\kappa T_{KB}) F^* e^{-T}(\kappa T_{KB}) \quad (16.43)$$

$$\bar{c}_N(\kappa T_{KB}) = \bar{y}_{n+2}(\kappa T_{KB}) \bar{b}(\kappa T_{KB}, l) - \bar{x}_e((\kappa - l)T_{KB}) \quad (16.44)$$

при різних  $l$  в межах (16.41).

Потім обчислюється  $l^*$ , при якому функція  $I(l) = |\bar{c}_N(\kappa T_{KB}, l)|$  досягає максимуму. Запізнення і динамічні параметри оцінюють за формулою:

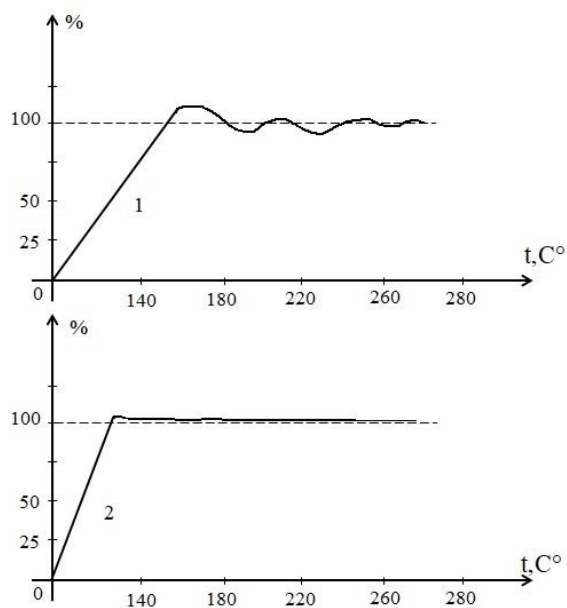
$$\tau^* = l T_{KB} \quad (16.45)$$

$$a_i = b_i(\kappa T_{KB}, l), i = 0, \dots, N \quad (16.46)$$

Після реалізації вище описаного алгоритму МП через буферну пам'ять і ПВ впливає на регулятор РЗ та виконавчий механізм холодильної установки 9 конвеєра 11, змінюючи його швидкість за допомогою ТПЧЗ та АДЗ.

На рис 16.7 представлені результати порівняльного дослідження цифрового ПД – закону керування (крива 1) і регулятора, який реалізує адаптивний алгоритм (крива 2) і яке виконано із застосуванням програмного забезпечення, розробленого в середовищі MATLAB.

Із аналізу кривих 1 та 2 слідує, що для САР з адаптивним законом управління час відпрацювання сигналу задавача впливу значно менше (крива 2), ніж в системі з ПД – цифрового керування (крива 1). При цьому відмітимо, що дисперсія регульовального параметру знизилась в 2,1 рази, а час перехідного процесу зменшився на 25% у порівнянні з ПД – цифровим керуванням.



**Рисунок 16.7. – Графіки зміни в часі параметра якості тіста:  
1 – ПІД-регулятор, 2 – ПІД-адаптивний регулятор.**

## **16.2. Оптимізація та інтенсифікація підготовчих операцій виробництва хліба**

На великому хлібокомбінаті борошно зберігається в бункерах. Це великі вертикальні циліндричні ємності на 30-35 тонн вихідної сировини. Півтора десятка бункерів, обв'язані трубами стисненого повітря і пневмотранспорту, являють собою склад безтарного зберігання борошна (БЗБ).

Доставляється борошно на підприємство спеціальним автомобільним транспортом. На автомобільних вагах провадиться початкове зважування ваги автомобіля. Залежно від сорту борошна ємності цистерни автомобіля під'єднують за допомогою гнучкого рукава-шланга до входу певного силосу, включається компресор автомобіля, і повітряно-борошняна суміш зверху завантажується в силос.

Після закінчення закачування порожній автомобіль знову проходить операцію зважування - так визначається кількість доставленого борошна.

Розглянемо цю технологічну операцію, як елемент автоматизованого управління. Для цього побудуємо АСУТП підготовчих операцій з використанням діагностичних експертних систем (ДЕС), систем контролю логістичних операцій завантаження/розвантаження бункерів, оцінки рівня борошна в бункерах та оцінки якості борошна. Таку систему побудуємо на базі нейромережових моделей та нейромережових комп'ютерів детально розглянутих в темі 8. В цьому випадку також будемо використовувати технології опису ситуацій і інтелектуальних систем підготовки прийняття рішень за допомогою темпоральних прецедентів і GBR- систем управління технологічним процесом [13].

Прецеденти можуть бути використанні в різних блоках ІСППР (наприклад, для організації пошуку рішень в проблемних ситуаціях або



навчання і тренінгу оперативно-диспетчерського персоналу хлібокомбінатів), що дозволяє підвищити ефективність прийняття рішень експертом або ОПР в різних аномальних ситуаціях:

- підготовка борошна в технологічних операціях, опара-тісто; випічки хліба, логістики тощо.

Прецедент – це опис проблеми або ситуації в сукупності з детальною вказівкою дій, які оператор або ОПР виконує з метою рішення даної проблеми. Прецедент включає: проблемну ситуацію, яка описує стан досліджуваного процесу, коли виник прецедент, рішення цієї проблеми, результат, який описує стан досліджуваного процесу після того, як проблемна ситуація завершилась [1,13]. Рішення типових ситуацій виконується в КУТП (верхній рівень) за допомогою ДЕС - діагностичних експертних систем. У процесі виробництва хліба виникають також нетипові ситуації системи газопостачання, електропостачання, водопостачання, тощо. Тому необхідно формувати знання щодо прийняття раціональних рішень шляхом аналізу ситуацій, які мають місце на протязі визначеного часу, оцінки варіантів її рішення і розробки стратегії для наступних дій з використанням додаткової експертної інформації. В цьому випадку, нетипову ситуацію (наприклад з якістю борошна) переводять в розряд типових, а її рішення зводять до вибору кращих із бібліотеки можливих рішень або комбінації деяких рішень [13]. Розглянемо більш детально методологію використання апарату штучних нейронних мереж для реалізації пошуку рішень на основі темпоральних прецедентів в СВР – системах управління стадією підготовки борошна.

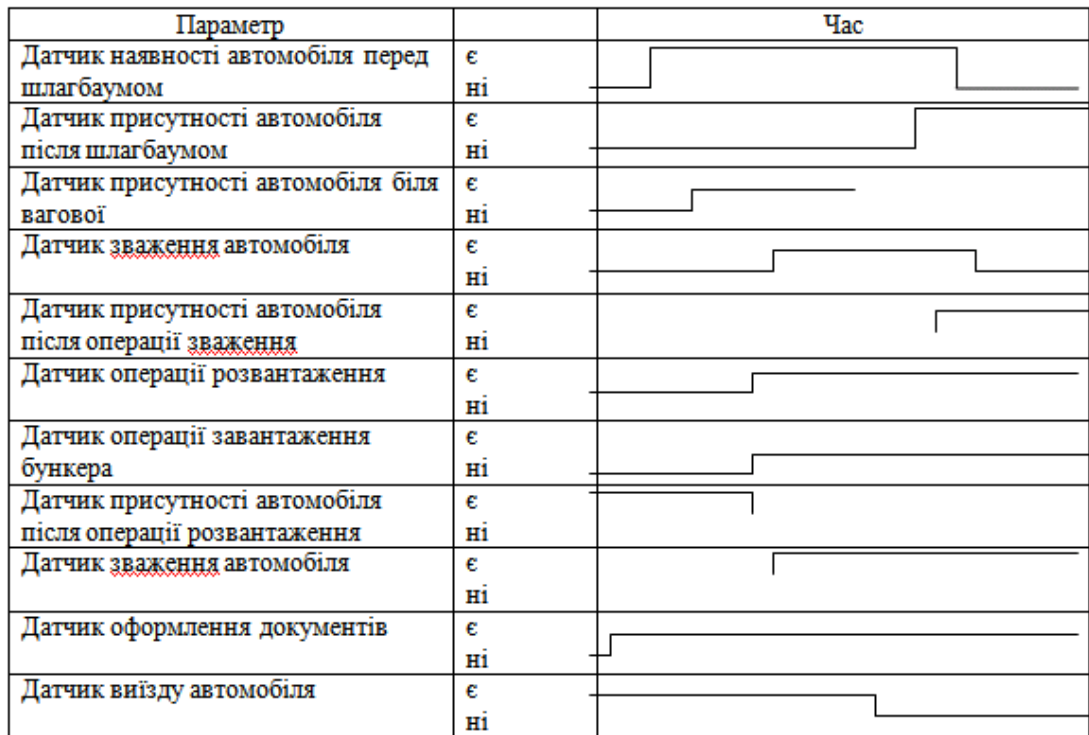
Найбільш простим способом адаптації існуючих алгоритмів виводу, на основі прецедентів щодо врахування фактору часу, є заміна деякого стану: розвантаження автомобіля з борошном в бункері; оцінка ДЕС – ключових параметрів (вага борошна, рівень борошна в бункерах); оцінка динаміки їх зміни (тобто формування температурних прецедентів). Це ми можемо представити у вигляді матриці значень, яка складена на конкретний період оцінки (нагляду) з визначеним інтервалом. При цьому в прецедент включають не лише значення параметрів в поточний момент часу, але і їх значення на деякий період часу до цього (історія).

Експерту за допомогою інтерфейса може бути надана більш проста для інтерпретації і заповнення матрична форма. ІТ –трансформацію в масив для використання СВР-методів будемо виконувати автоматично в ДЕС. Також для адаптації існуючих алгоритмів пошуку рішень щодо оцінки операцій підготовки борошна темпоральним прецедентам можна використати підхід, що базується на обліку та аналізу рішень, одержаних за допомогою методів розпізнавання ситуацій [11,66].

Подібні методи суджень знайшли використання в задачах діагностики і управління нештатними ситуаціями в ІС управлінні процесами розвантаження автомобілів з борошном на вході хлібозаводу. Операції заїзду автомобіля-борошновозу в штатному режимі формують в часі стандартні послідовні події [1].

При цьому процес роботи точки (моменту) прибуття/виїзду автомобіля з

борошном після його операцій зваження після/до розвантаження, оцінки кількісних параметрів може бути представлений у вигляді послідовних однотипних операцій, кожна з яких також є сукупністю стандартних операцій, які фіксуються візуальними датчиками, ваговими пристроями, тощо. На рис. 16.8 наведено процес штатної операції заїзду борошновозу до хлібокомбінату і оцінки чистої ваги борошна.



**Рисунок. 16.8. Процес ситуації заїзду автомашини з борошном**

Зміни значень параметрів, одержаних з датчиків, розташованих в точці заїзду, з врахуванням часу зваження, розвантаження, зваження представлено у вигляді матриці (рис.16.9).

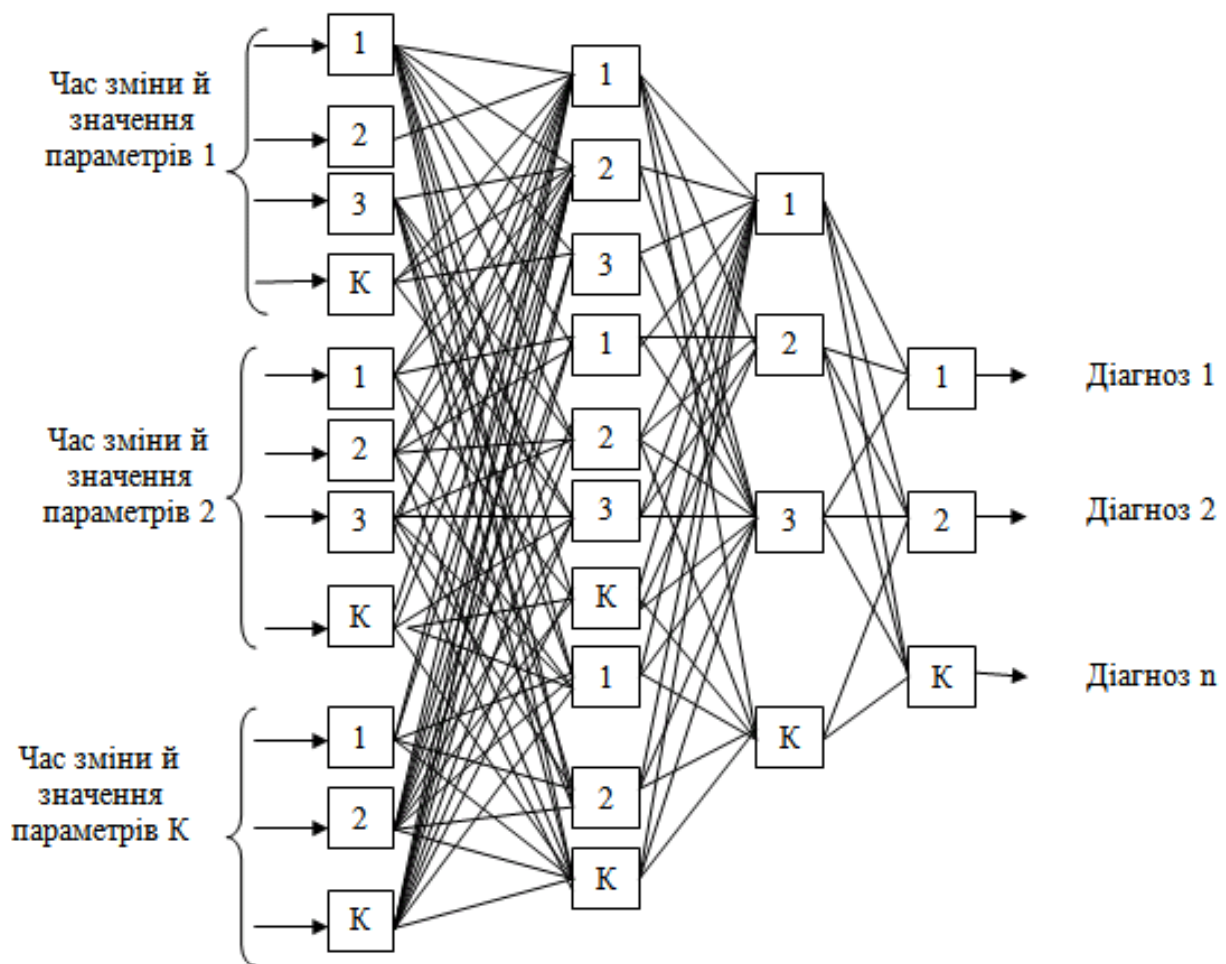
Параметр	1	2	3	4	5	6	...	10
Датчик наявності автомобіля перед шлагбаумом	0	1	1	1	1	1	...	0
Датчик присутності автомобіля після шлагбаумом	0	0	0	0	0	0	...	1
Датчик присутності автомобіля біля вагової	1	1	1	1	1	1	...	0
Датчик присутності автомобіля до операції розвантаження	1	1	1	1	1	1	...	1
.....								
Датчик оформлення документів	1	1	1	1	1	1		0
Датчик виїзду у розвантаженого автомобіля	1	1	1	1	0	0		0

**Рисунок 16.9. Зміни значення положення датчиків з врахуванням часу**

Аномальні ситуації можуть бути відокремлені за рахунок аналізу цієї послідовності шляхом перевірки подібних подій, які ми бачимо за допомогою візуальних датчиків, а також еталонних моделей штатного або нештатного

розвитку ситуацій. При цьому слід аналізувати ситуацію «в динаміці», приймаючи рішення з врахуванням знань, одержаних від експертів [36].

З метою визначення типових і нештатних ситуацій будемо використовувати різні моделі прецедентів, які побудовані на алгоритмах співставлення поточних ситуацій із БП, так і на основі нейромережових моделей. Штучні нейронні мережі (ШНМ) – математичні моделі, а також їх програмне забезпечення або апаратна реалізація, побудована з використанням принципу організації і функціонування біологічних нейронних мереж – мереж нервових клітин живого організму (детально розглянуті в 1 розділі монографії [13]). ШНМ представляє собою систему з'єднаних і взаємодіючих між собою штучних нейронів [8,27]. На рис 16.10 наведено нейромережеву модель для задач розпізнавання аномальних ситуацій, стану обладнання та якості борошна, яке надходить до опарного відділення.



**Рисунок 16.10. Нейромережева модель для задач класифікації і розпізнавання автомобіля з борошном**

Для початкового експертного аналізу виділено з метою досліджень – багатошаровий перцептрон – нейронну мережу прямого розповсюдження. Кількість шарів нейронної мережі обирали емпіричним шляхом. Кожний нейрон мережі має нелінійну повсюди диференційовану функцію активації, наприклад, сигмоїдального виду:

$$F(Y) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha y}}, \quad (16.47)$$

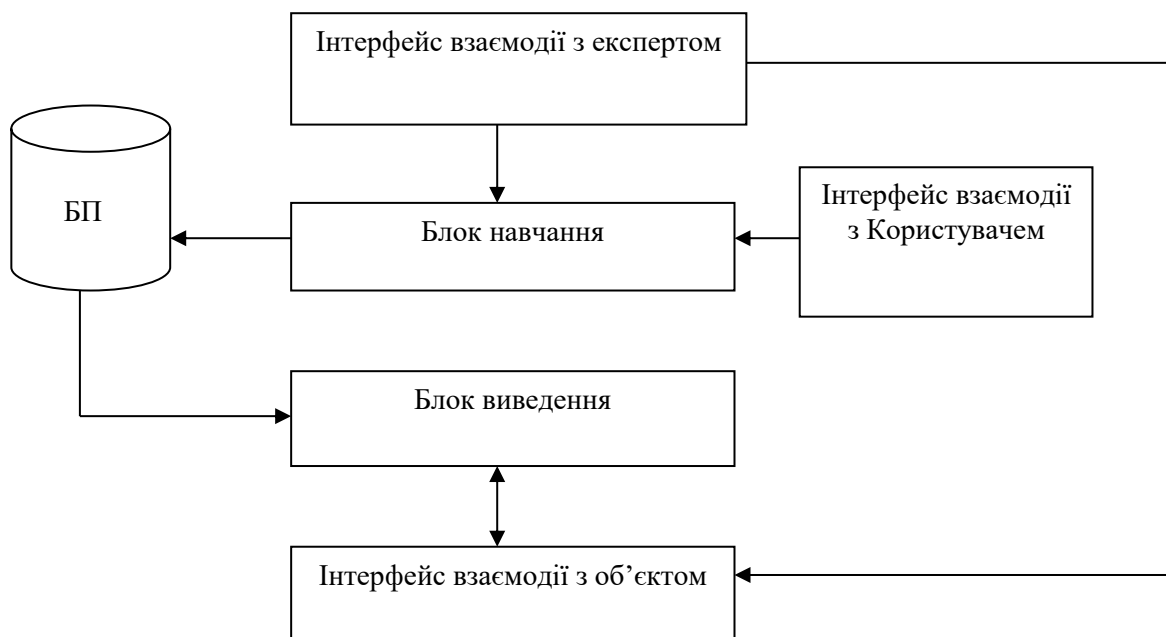
де  $\alpha$  – параметр нахилу сигмоїдальної функції.

Визначення аномальних ситуацій із всієї множини ситуацій будемо розглядати, як задачу класифікації. При інтерпретації результатів звичайно будемо рахувати, що намір класу буде визначати номер виходу мережі, на якому з'явиться максимальне значення.

При такому способі кодування інколи будемо вводити поняття упевненості мережі у тому, що приклад відноситься до цього класу.

Для навчання багат шарового перцептрону, як правило, будемо використовувати метод зворотного розповсюдження помилки, яку використовуємо з метою мінімізації помилки роботи перцептрона і одержання бажаного виходу [8,27,36].

Запропоновані методи реалізовані у прототипі СВР-модуля ІСППР АСУТП хлібозаводу для діагностики технологічних ситуацій (аварійних) і контролю роботи ІС управління процесами завантаження бункерів-розвантаження автомобіля з борошном, оцінки кількості борошна, а також якості борошна і його подальшого використання в технологічному процесі опара - тісто. Архітектура ІС аналізу (типових і аномальних) ситуацій наведена на рис.16.11.



**Рисунок. 16.11. Архітектура інтелектуальної системи ІС типових ситуацій в АСУТП хлібокомбінату**

Розроблений модуль із двох компонентів: блока, який виконує роль синтаксичного аналізатора і блока, що реалізує роботу нейронної мережі. В задачу першого компоненту входе: розділення часу роботи автомобіля з

борошном та відокремлення наступних ситуацій: 1 – автомобіль перед шлагбаумом; 2 – датчик наявності автомобіля після шлагбаума; 3 – зчитування номеру автомобіля; 4 – період зважування автомобіля з борошном; 5 – розвантажування борошна; 6 – оцінка рівня борошна в бункерах; 7 – зважування порожнього автомобіля; 8 – оцінка кількості борошна; 9 – оцінка якості борошна; 10 – виїзд автомобіля; 11 – датчик виїзду автомобіля. У результаті роботи даного блоку створено 2 файли з розширенням CSV для навчальної і тестової вибірок відповідно. На вхід даного блоку надходять початкові дані, які формуються із протоколів, що створені програмним комплексом SPARK 2.3. програма виділяє окремі ситуації з автомобілем (борошновоз) і розбиває їх на елементарні операції та при необхідності ОПР на своєму КМ може бачити графік зміни датчиків (сигнали 1 - 11). В межах одного протоколу ІС управління заїздом – зваженням – розвантаженням – зваженням порожнього автомобіля виконується навігація по ситуаціям 1 – 11.

Нештатні ситуації можуть мати різні варіанти відзеркалення на КМ. Користувач може додати в тестову або навчальну вибірку будь-яку ситуацію. Тоді ОПР вказує одну із операцій:

- операція заїзду автомобіля пройшла успішно;
- операція зважування пройшла успішно;
- операція розвантаження виконана з порушенням часу розвантаження борошна в бункері;
- проблеми із розвантаженням;
- проблеми з вагами;
- проблеми з контролем якості борошна;
- проблеми з виїздом автомобіля;
- інші проблеми з датчиками положення.

Другий блок працює в двох режимах: навчання і тестування нейромережі за допомогою вибірок, які сформовані першим блоком. Нейронна мережа, яка функціонує у другому блоці має топологію багатошарового персептрона з кількістю входів, які дорівнюють добутку числа датчиків на кількість часових відрізків, і кількості виходів, рівним числу можливих діагнозів. Кількість закритих шарів визначається емпірично. Таку мережу навчають методом зворотнього розповсюдження помилки й використовує сигмодальну функцію в якості активізаційної [8,27]. Вмодулі є можливість налагодження параметрів, таких як швидкість навчання, число ситуацій, тощо.

На технологічні лінії виготовлення булочно-кондитерських виробів борошно зі складу БЗБ надходить по трубах пневмотранспорту: відкривається вентиль стисненого повітря, включається роторний живильник певного силосу, і повітряно-борошняна суміш з нижньої конусоподібної частини силосу, пройшовши через просіювач і десятки метрів труб, виявляється в необхідному виробничому бункері. Це процес відкачування борошна з силосу.

В кінці кожної зміни знімається інформація по залишкам борошна в кожному силосі, після чого ці дані передаються змінним майстрам, начальнику цеху, а також в бухгалтерію. Робилося це до впровадження автоматизованої системи обліку витрати борошна наступним чином: оператор БЗБ, піднявшись

на останній поверх, за допомогою кишенькового ліхтаря через люки по верхній кромці борошна оцінював її кількість в кожному силосі. Такий контроль кількості сировини часом доводилося робити на зміну кілька разів, так як в процесі закачування-відкачування необхідно постійно уявляти собі міру завантаженості силосів: переповнення силосів загрожує певними наслідками, а недовантаження веде до неефективного використання їх обсягів. Але найголовніше, така суб'єктивна оцінка кількості борошна дає велику похибку визначення залишків (до двох-трьох тонн на силос). Справа в тому, що різні сорти борошна мають різну щільність, і якщо житнього борошна в силос можна завантажити до 30-31 тонни, то борошна вищого сорту - до 35 тонн. Крім того, в процесі відкачування борошна в нижній конусоподібній частини силосу утворюються порожнечі, часом великі за обсягом, які не є видимими зверху крізь товщу борошна навіть з ліхтарем.

Оператор БЗБ протягом трудової зміни, крім силосів, постійно має справу ще з безліччю іншого обладнання: з декількома просіювачами, парою десятків виробничих бункерів. Все це обладнання територіально розкидано. Крім прийому доставленого автомобілем борошна, оператор повинен вчасно заповнити певний виробничий бункер необхідним сортом борошна або необхідної сумішшю різних сортів борошна для того, щоб не було простою в роботі наступних виробничих ділянок технологічного ланцюжка. Оператор повинен бути постійно напоготові і вчасно вимкнути подачу борошна в той чи інший бункер, щоб уникнути його переповнення або при виникненні аварійної ситуації. Все сказане вимагає створення системи, яка б збирала поточну інформацію про роботу обладнання і відображала б її в операторній в компактному і зручному для сприйняття вигляді.

Необхідно сказати, що на даному підприємстві інформація збиралася і відображалася на великих мнемощитах за допомогою лампочок розжарювання. З цих же мнемощитів за допомогою кнопок і перемикачів можна було включати електродвигуни роторних і шнекових живильників, управляти кранами-перемикачами, направляючи борошно в той чи інший виробничий бункер. Але внаслідок низької надійності елементів цієї лампочно-кнопкової системи все, що залишилося працездатним до моменту розробки нової системи, - це кілька лампочок індикації переповнення бункерів і кнопки включення роторних живильників.

Розглянемо детально функціонування автоматизованої системи управління бункерами з різними сортами борошна.

Завдання перед розробниками автоматизованої системи спочатку ставилася проста: в режимі реального часу відслідковувати кількість борошна в кожному силосі за допомогою сучасних апаратно-програмних засобів. Тривіальність технічного вирішення цього завдання очевидна: використання тензодатчиків і тензоперетворювачів, перетворення кодів АЦП в реальні значення ваг, збереження даних в електронному архіві АРМ оператора і передача цих даних у вигляді звітних форм на сервер локальної комп'ютерної мережі підприємства для бухгалтерії. Точність обліку залишків борошна за допомогою такої системи збільшується на порядок. Але система, постійно

сканує інформацію про значення ваги борошна в силосах, при невеликій доробці може виконувати ще ряд важливих функцій, які дозволяють більш ефективно використовувати обсяги силосів і в якійсь мірі полегшують працю оператора БЗБ. Зупинимось докладніше на цих функціях.

Крім значень ваги, система може підраховувати і видавати на екран дисплея АРМ оператора дані про вільні обсяги силосів. Для цього програма використовує значення максимальної ваги борошна даного сорту, який можна завантажити в силос. Оператор має можливість натисканням кнопки миші переназначити сорт перед завантаженням в порожній силос борошна іншого сорту. Система за призначеним сорту корегує значення максимальної ваги і надалі це значення використовує для підрахунку вільних обсягів. В результаті є оперативна інформація, володіючи якою, можна раціонально і ефективно використовувати обсяги силосів. При перевищенні максимальної ваги борошна в процесі закачування система сама припинить закачування шляхом відключення компресора муковоза, щоб уникнути переповнення силосу. Призначення сортів борошна для силосів дозволяє системі також підраховувати загальну кількість готівкового борошна з різних сортів.

Система надає оператору можливість "ділити" борошно з одного автомобіля в кілька силосів. У цьому випадку оператор повинен попередньо задати значення ваги борошна для закачування в перший силос. Коли в силос закачується задана вага, система автоматично відключить компресор автомобіля. Ємності автомобіля підключаються до входу другого силосу, і задається нове значення закачуваної ваги. Ці операції повторюються до тих пір, поки все доставлене борошно не буде "розкидане" в кілька силосів.

Якщо у вхідні труби силосів вбудувати датчики, що фіксують моменти початку і закінчення закачування, то з'являється можливість в автоматичному режимі визначити кількість закачаного за кожен сеанс борошна.

При появі потоку повітряномучної суміші спрацьовує датчик, система запам'ятовує початкову вагу силосу. В кінці закачування по зворотному спрацьовуванню датчика визначається кінцева вага. В результаті маємо вагу борошна, доставлену автомобілем. Може скластися ситуація, що в цей час йде відкачка з даного силосу. У такому випадку система автоматично перериває відкачування шляхом відключення роторного живильника силосу з початком закачування.

Ввівши в систему сигнали з контактів магнітних пускачів включення роторних живильників відкачування силосів, можна відстежувати в реальному часі кількість відкачаного борошна. Ця інформація дозволяє оператору контролювати процес заповнення виробничих бункерів і швидкість відкачування.

Система підраховує також загальну кількість борошна, закачаного в даний силос і відкачаного з силосу за зміну, за добу, а також сумарну кількість борошна одного сорту по силосах. Ця інформація відображається на екрані дисплея, а також заноситься до звітних форм для бухгалтерії.

### 16.3. Локальні системи автоматизованого керування виробництвом хліба

Розглянемо синтез автоматичної системи керування процесом очищення борошна від металевих частинок за допомогою магнітних сепараторів.

Рівняння ідеальної сепараційної характеристики для магнітного сепаратора з моношаром борошна:

$$\varepsilon_H(\chi) = \begin{cases} 0, & \text{при } \chi < \chi_p \\ 0,5, & \text{при } \chi = \chi_p \\ 1, & \text{при } \chi > \chi_p \end{cases} \quad (16.48)$$

де  $\chi$  - магнітна сприятливість магнітних частинок:  $\chi_{min}, \chi_{max}$  - мінімальне, максимальне значення магнітної сприятливості частинок металу;  $\varepsilon_H(\chi)$  - ідеальна сепараційна характеристика,  $\chi_p$  - магнітна сприятливість розділення. На основі аналізу рівнянь масопереносу [13] і балансу магнітних та відцентрованих сил, що діють на магнітні частинки в борошні, одержано вираз для магнітної сприятливості розділення  $\chi_p$ :

$$\chi_p = \frac{v^2 \rho_0}{RH_{grad}H} \quad (16.49)$$

де:  $v$  - лінійна швидкість обертання барабана сепаратора;  $R$  - радіус барабана сепаратора;  $H$  - напруженість магнітного поля магнітної системи сепаратора.

Аналіз рівняння (16.49) показує, що реальним регулюючим впливом, для сепараторів з постійними магнітами, який стабілізує межу розділення  $\chi_p$ , є швидкість обертання сепаратора. Ця швидкість впливає на відцентрову силу, змінює баланс сил, що діють на залізну частинку в борошні, умови очищення борошна та виділення металевих частинок [13].

Кінетику процесу сухого магнітного виділення із борошна металевих частинок опишемо формулою [13]:

$$\varepsilon(\chi, t) = (1 - e^{-t\tau k}) + \frac{1}{2} e^{-t\tau B}, \quad (16.50)$$

де

$$r = \frac{H_{grad}H}{3\alpha \cdot 2B\gamma_{BX}(\chi)} \left[ \frac{H_{grad}H(\chi_{max} - \chi_{min})2B}{3D\alpha} - 1 \right], \quad (16.51)$$

Час процесу сепарації металевих частинок із борошна  $t$  залежить від довжини робочої зони сепаратору  $L$  та лінійної швидкості обертання його барабану  $v$ .

У формулі (16.51)  $H$  - напруженість магнітного поля сепаратора;  $B$  - товщина шару борошна, що поступає до відділення опара-тісто;  $\alpha$  - коефіцієнт опору середовища,  $D$  - коефіцієнт дифузії;  $\gamma_{oxid}(\chi)$  - диференційна функція розподілу властивості борошна.

Вимогою до якості керування процесом очищення борошна від металевих частинок є розподілення на чисте борошно і металеві частинки - залізо.

Цей процес є стохастичним і вимагає більш детальної ідентифікації параметрів, які визначають динамічні режими очищення борошна:  $\tau_p$  - час



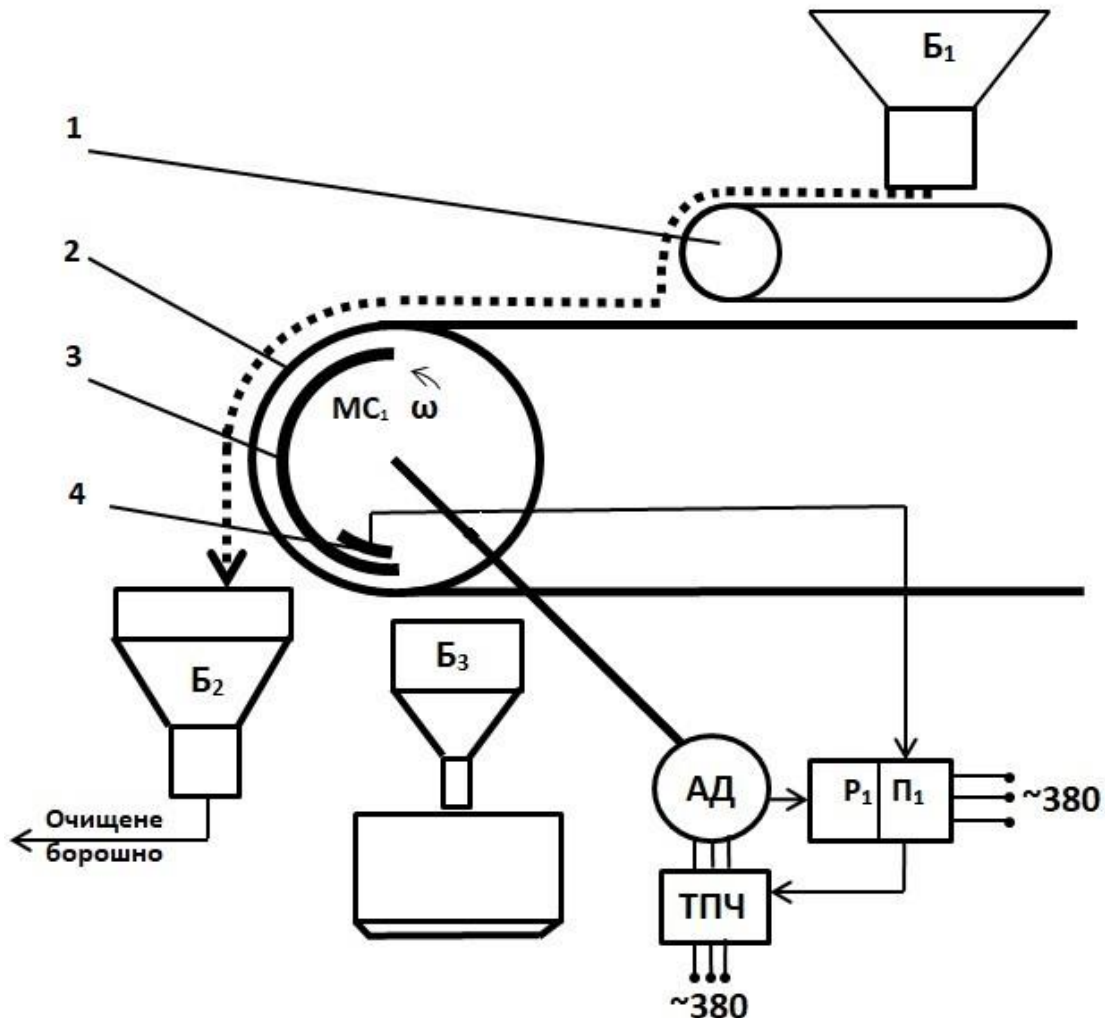
еквівалентного запізнювання,  $M$  – запаси борошна,  $Q$  – продуктивність процесу очищення:

$$Q_n = \frac{M}{\tau_0}, \quad (16.52)$$

На рис 16.12. наведено функціональну схему автоматизації процесу виділення (очищення) борошна від магнітних частинок.

Борошно з бункера  $B_1$  через подавач 1 надходить на конвейер 2  $MC_1$  з магнітною системою 3. В системі очищення борошна від металевих частинок використано наступні елементи:

$MC_1$  – магнітний сепаратор;  $B_2$  - бункер для очищеного борошна;  $B_3$  - бункер для магнітних частинок; АД – асинхронний двигун; ТПЧ – тиристорний перетворювач;  $\omega_1$  - кутові швидкості обертання магнітного сепаратора;  $MC_1$ , а також 2 – барабан; 3 – магнітна система; 4 – здавачі магнітної індукції у вигляді магнітних резисторів. П1 – перетворювач постійного струму; P1 – регулятор межі розділення  $x_{p1}$  – сепаратора  $MC_1$ .



**Рисунок 16.12. Функціональна схема автоматизації процесу виділення (очищення) борошна від магнітних частинок.**

Борошно з бункера  $B_1$  поступає через давач на магнітний сепаратор МС1, що має межу розділення  $x_{p1}$ , сепараційну характеристику  $\varepsilon_1(\chi)$ . При зміні характеристик борошна задана межа розділення  $x_{p1}$  стабілізується зміною кутової швидкості  $\omega_1$ , за допомогою тиристорного перетворювача ТП. В бункер  $B_1$  - йде борошно, а до  $B_2$  залізни частинки, вихід яких  $\gamma_1(\chi)$ .

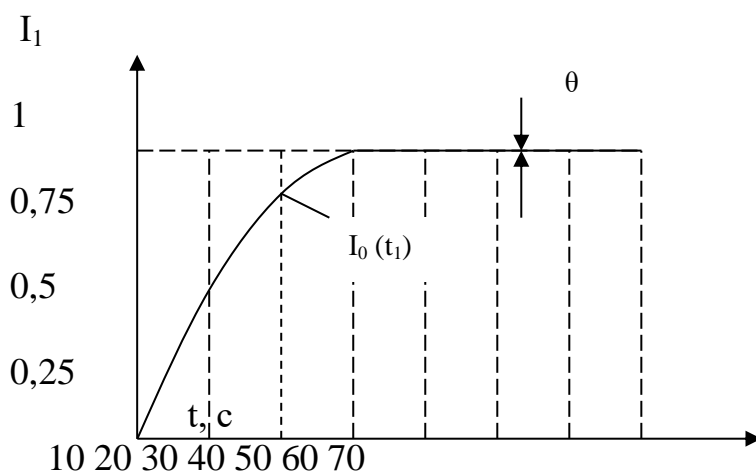
Виконані дослідження імпульсивної системи регулювання межі розділення магнітного сепаратора шляхом зміни швидкості обертання його барабану. Цей процес опишемо кінцево – різностним рівнянням системи:

$$I_B(n + 1) + A_1 I_B(n) = A_1 I_{B_0}(n), \quad (16.53)$$

де  $I_B$  - вихідний токовий сигнал давача магнітної індукції у робочій зоні сепаратора;  $I_{B_0}$  – завдання.

На рис. 16.13. побудована реакція імпульсної системи на одиничну східчасту зміну завдання шляхом рішення кінцево-різністного рівняння системи (16.53).

Отже, підвищити ефективність розділення борошна на чисте і виділення магнітних металевих частинок можливо за допомогою АСУ, в якій чистоту борошна можливо досягти шляхом регулювання швидкості обертання барабана за допомогою ТП, та імпульсивного цифрового регулятора швидкості асинхронного електродвигуна [ 28,35].



**Рисунок 16.13. Реакція системи на одиничну східчасту зміну завдання**

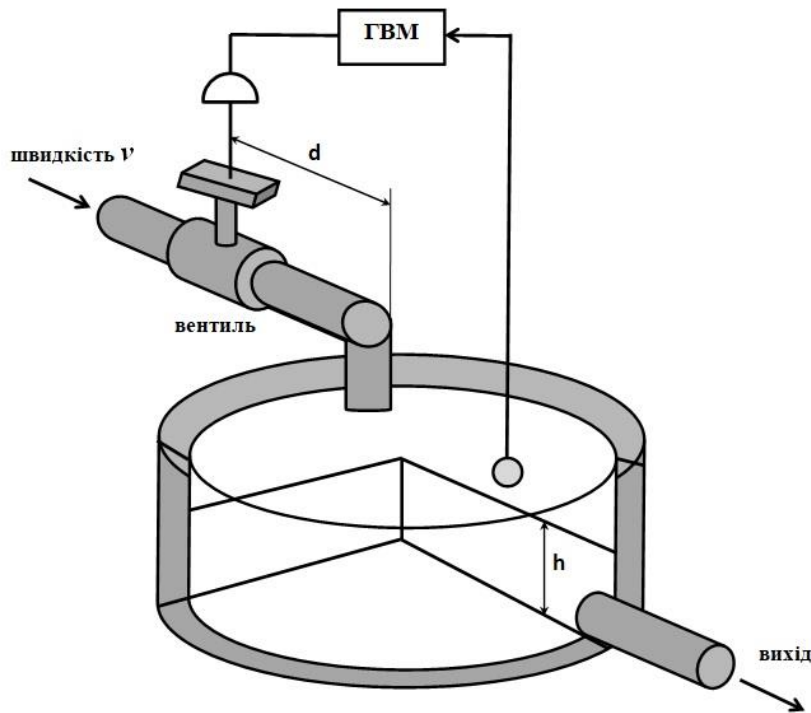
В системі управління очищенням борошна від металевих частинок використано також регулятор  $P_1$ , який має передатню функцію:

$$G_c(S) = \frac{k(S+2)}{S+12}, \quad (16.54)$$

Регулятор  $P_1$  враховує величину повітряного проміжку ( $\Pi$ ) і дозволяє скорегувати зміни чинників і межі розділення  $\chi_p$  шляхом вибору оптимальної швидкості барабана 2 і його конвеєра.

Перейдемо до синтезу деяких локальних систем керування відділенням приготування тіста. Система керування рівнем рідини в тістомісильній машині відноситься до відносно простих адаптивних систем.

На рис. 16.14. наведено систему кегування рівнем рідини ( $\alpha$ ), структурну схему системи.



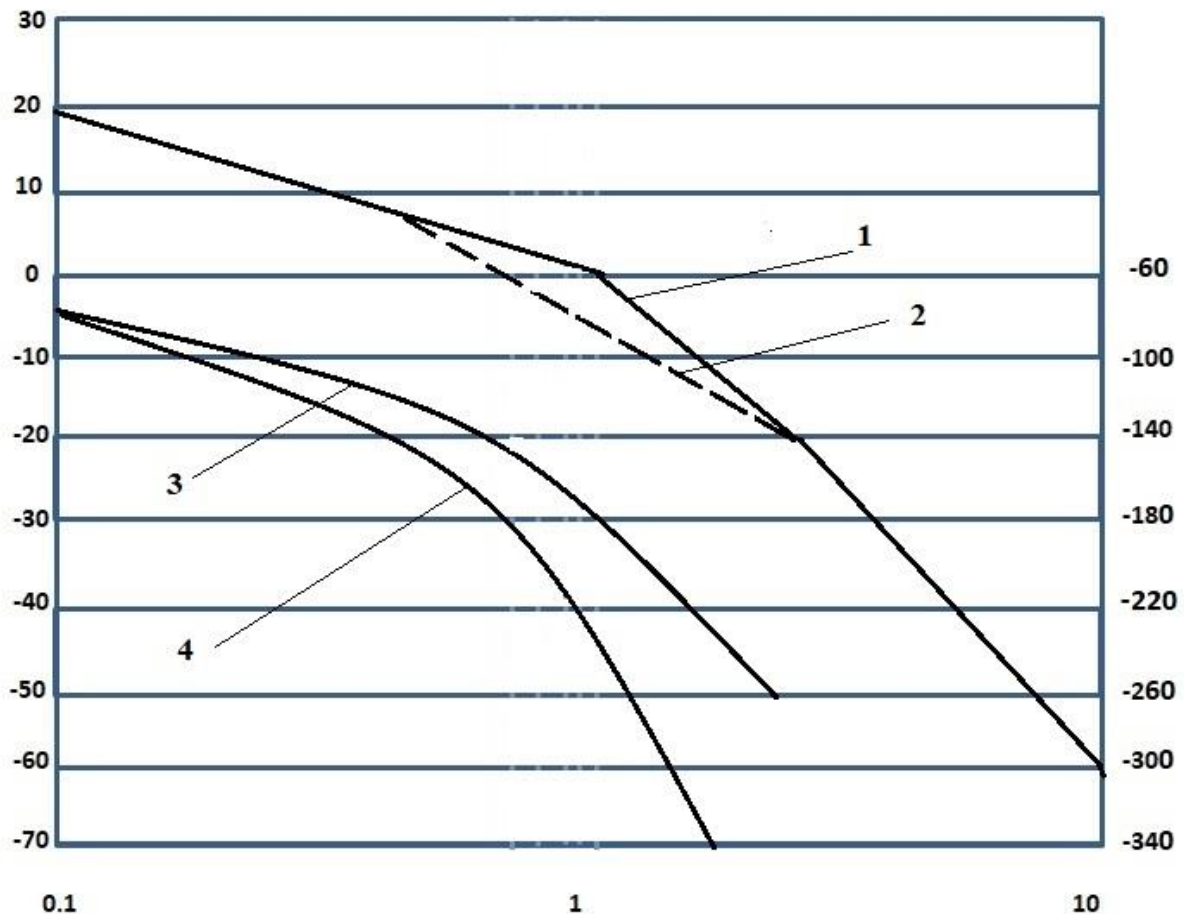
**Рисунок 16.14. Система керування рівнем рідини тістомісильної машини**

Запізнення між вентилем і точкою введення рідини в резервуар складає  $T = d/vc$ , де  $d$  – розмір, який визначено конструктивно,

$v$  – швидкість. Якщо, наприклад, потік рідини дорівнює  $5 \text{ м}^3/\text{с}$ , площа поперечного перетину трубопроводу  $1 \text{ м}^2$ , а відстань  $d = 5 \text{ м}$ , то запізнення  $T = 1 \text{ с}$ . Тоді передавальну функцію розімкненого контуру запишемо у вигляді:

$$GH(p) = G_A(p)G(p)G_f(p)e^{-pT} = \frac{31,5}{(Sp+1)(30S+1)\left[\left(\frac{S^2}{9}\right) + \left(\frac{S}{3} + 1\right)\right]} e^{-pT} \quad (16.55)$$

Відповідно до цієї функції діаграма частотної характеристики буде наведено відповідно на рис 16.15.



**Рисунок 16.15. Частотна характеристика системи керування рівнем рідини**

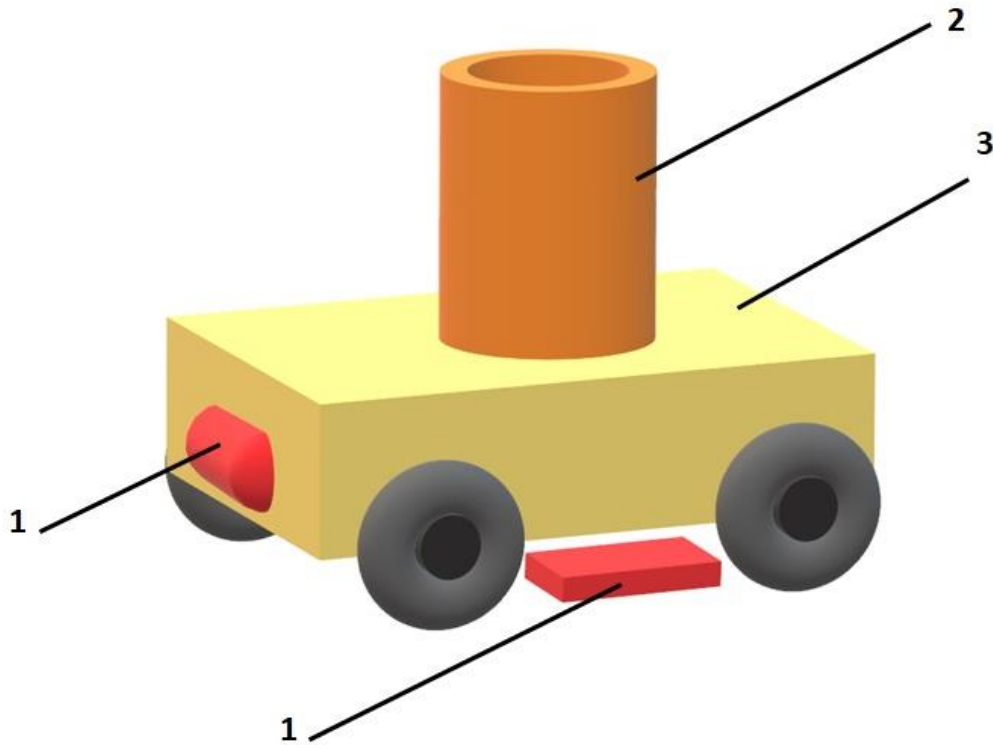
- 1 – асимптотична характеристика,
- 2 – точна характеристика,
- 3 – характеристика без запізнення,
- 4 – характеристика зі запізненням.

На діаграмі наведено дві фазові характеристики – одна без врахування запізнення інша з врахуванням запізнення. Логарифмічна амплітудна характеристики перетинає рівень ОДБ, коли  $\omega = 0,8$ . Таким чином, при відсутності запізнення запас по фазі складав би  $40^\circ$ . В той же час, з врахуванням запізнення на частоті  $\omega = 0,8$  фазовий зсув дорівнює  $-183^\circ$ , і система є нестійкою. Тому, щоб мати достатній запас стійкості по фазі, необхідно зменшити коефіцієнт підсилення на 5дБ, тобто його нове значення повинно бути рівним  $K=31,5/1,78=17,7$ .

Ланка запізнення завжди вносить додатковий від'ємний фазовий зсув і відповідно погіршує стійкість замкненої системи. Оскільки в багатьох системах з великим запізненням для одержання стійкості необхідно зменшувати коефіцієнт підсилення, але при цьому збільшується помилки в системі щодо регулювання рівня рідини.

Дистанційно керована платформа з діжою, в якій тісто надходить в систему підготовки хліба.

Один із прикладів такого апарату наведено на рис.16.16, а структурна схема системи керування швидкістю його руху наведена на рис.16.17.



**Рисунок 16.16. Дистанційно керована платформа з діжою**

- 1 – візуальні датчики;
- 2 – діжа з тістом;
- 3 – платформа.

Таблиця 16.1

Частотні характеристики системи

$\omega$	0	1,	1,	2,	2,	4	6
		2	6	0	8		
д	2	1	1	1	1	2,	-
Б	0	8,4	7,8	6,0	0,5	7	5,2
Г	0	-	-	-	-	-	-
радуси		65	86	108	142	161	170

Інформація про задану швидкість передається апарату по промисловому інтернет-зв'язку. На шляху руху апарату-діжі виникають збурення  $D(S)$ , які пов'язані з різного роду нерівностями.

Система керування у випадку ступеневого вхідного сигналу  $R(S)$  повинна забезпечувати малу сталу помилку і мале відносне перерегулювання. При синтезі такого керування необхідно:

1. Спочатку одержати математичну модель для сталої помилки:

$$e_m = \lim_{s \rightarrow 0} pE(p) = \lim_{s \rightarrow 0} p \left[ \frac{R(p)}{1+G_c G(p)} \right] = \frac{1}{1+G_c G(0)} = \frac{1}{1+k/2} \quad (16.56)$$

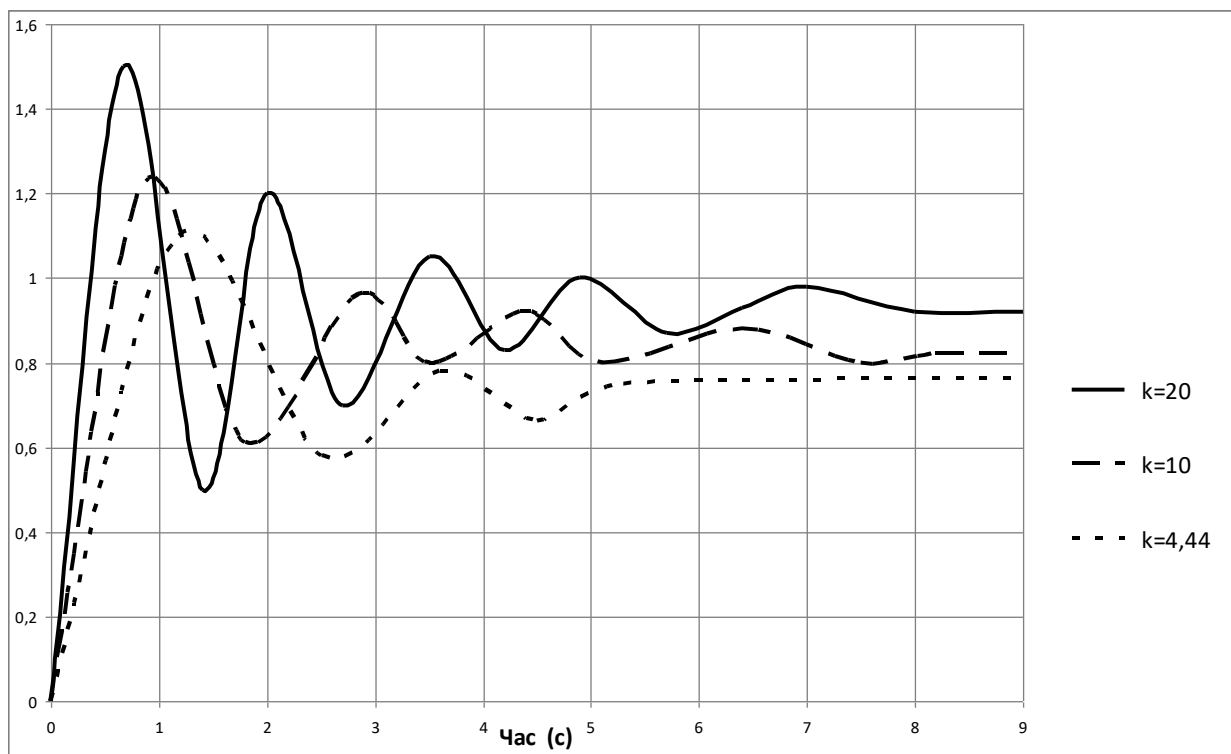
2. Якщо вибрати  $k=20$ , то стала помилка буде складати 9% від амплітуди вхідного ступеневого сигналу. Приймаючи це значення, приведемо вираз  $G_c G(p)$  до виду, для побудови частотно-фазової характеристики.

$$G_c G(p) = \frac{10(1+p)}{(1+p)(1+\frac{s}{2}+\frac{s^2}{4})} \quad (16.57)$$

3. Побудувати частотну характеристику об'єкта досліджень. Для цього проведемо дослідження системи в діапазоні  $0 \leq \omega \leq 6$ , а результати наведені в табл. 16.1. На рис. 16.18 наведено частотно-фазову характеристику об'єкта дослідження.

При  $M_p = 12$ ДБ, запас по фазі дорівнює  $15^\circ$  і система є недодемфованою, а перерегулювання може бути в межах 60-61%.

Для зменшення перерегулювання, ми можемо змінити в менший бік коефіцієнт підсилення системи. З цією метою необхідно провести синтез системи: перерегулювання обмежити 25%;  $\xi = \xi_{\text{дом}}$ , яке відповідає домінуючим кореням, рівним 0,4, а  $M_p = 1,35$  або  $20 \log M_{pa} = 2,6$ ДБ, де  $\xi$  - коефіцієнт затухання. Зменшення коефіцієнта підсилення еквівалентно зміщенню частотної характеристики вертикально вниз, як наведено на рис.16.18. При частоті  $\omega_1 = 2,8$  ця характеристика буде дотичною до лінії, відповідного значення 2,6ДБ. При цьому зміщення частотної характеристики буде складати 12,8ДБ, що еквівалентно зменшенню коефіцієнта підсилення в 4,5 разів, тобто він буде дорівнювати  $k=20/4,5 \approx 4,44$ .



**Рисунок 16.18. Реакція системи на одиничний ступеневий вхідний сигнал  $r(t)$  при трьох значеннях коефіцієнта  $k$**

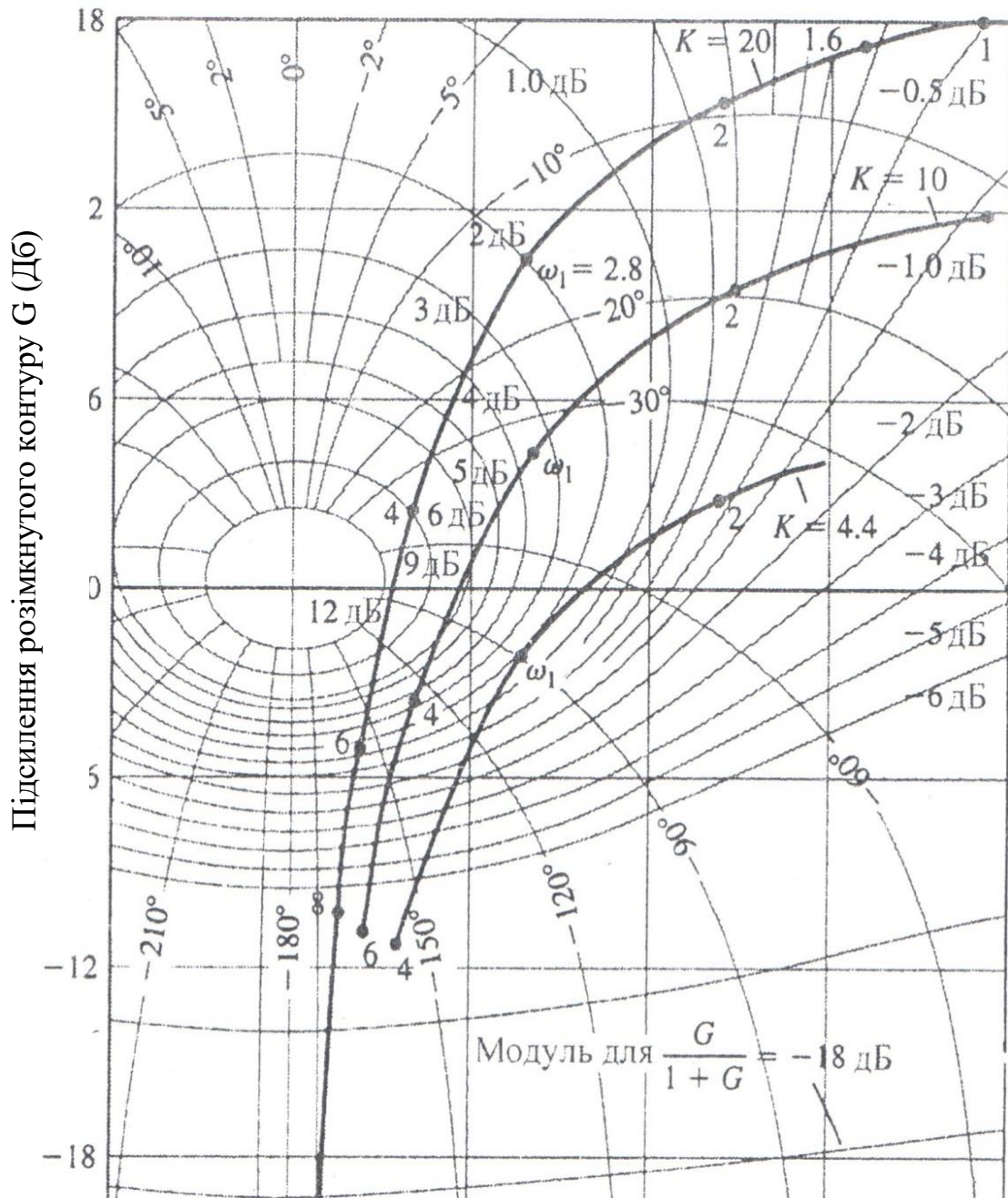
При такому значенні  $k$  стала помилка буде дорівнювати:

$$e_{SY} = \frac{1}{1+4,4/2} = 0,31 \quad (16.58)$$

тобто 31% від амплітуди вхідного ступеневого сигналу.

В дійсності реакція системи на ступеневий вплив при  $k=4,44$  має перерегулювання 32%. На рис.16.18 наведено реакцію системи на одиничний ступеневий вхідний сигнал  $r(t)$  для трьох значень коефіцієнта:  $k_1 = 20; k_2 = 10; k_3 = 4,44$ .

Якщо прийняти коефіцієнт підсилення рівним 10, то ми одержимо перерегулювання  $\epsilon$  48% і сталу помилку, що дорівнює 17% від амплітуди вхідного впливу. Показники якості системи зведені в табл. 16.2. В якості компромісного рішення ми оберемо значення  $k=10$  і зсунемо вхідну частотну характеристику із частотного логарифмічного діаграми на  $20 \lg 2 = 6$ ДБ, як показано на рис 16.19.



Фазовий зсув розімкненого контуру,  $G$  (град.)

**Рисунок 16.19. Частотнологарифмічна характеристика**

Із діаграми рис при  $k=10$  ми маємо  $M=7\text{ДБ}$  і запас по фазі  $26^\circ$ . Тому домінуючим кореням відповідає оцінка  $\xi = 0,34$ , при якій перерегулювання повинно складати 30%.

Дійсні показники якості наведені в табл. 16.2.



Таблиця 16.2.

## Показники якості при різних значеннях К

К	4,44	10	20
Відносне перерегулювання %	32,4%	48,4%	61,4
Час устанавлення, с	4,94	5,46	6,58
Час максимума перехідної характеристики, с	1,19	0,88	0,67
$e_{ss}$	31%	16,7%	9,1%

Полоска пропуску системи  $\omega_R = 5$ . Тому прогнозуємий час сталості дорівнює (за критерієм 2%)

$$T_S = \frac{4}{\xi\omega} = 3,3\text{с}, \quad (16.59)$$

Тобто, при  $\xi = 0,34$ ,  $\omega_B = 1,4 \omega_{\Pi}$ . Дійсний час устанавлення дорівнює приблизно 5,4с, як показано на рис 16.19.

Вплив збурень (якщо вони мають ступеневий характер) будемо оцінювати за допомогою теореми про кінцеве значення  $R(S)=0$ , тобто:

$$y(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} p \left[ \frac{G(p)}{GG_c(p)} \right] \left( \frac{1}{p} \right) = \frac{1}{4+2k}, \quad (16.60)$$

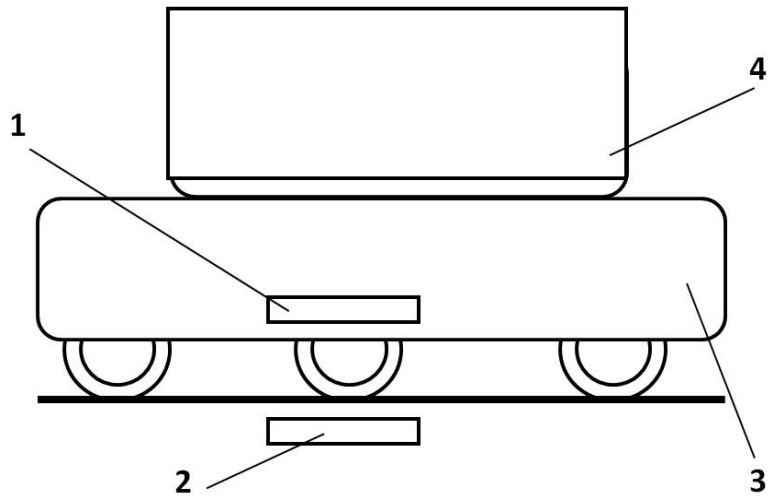
Це означає, що якщо збурення має одиничну амплітуду, то його вплив зменшується в  $(4+2k)$  разів.

При  $k=10$   $y(\infty) = 1/24$ , тобто помилка, яку утворюють збурення, складає 4% від амплітуди збурення. Таким чином, можливо вважати, що значення  $k=10$  є найбільш раціональним, виходячи із загальних вимог до якості системи. Як сумарний нашого синтезу, можливо константувати:

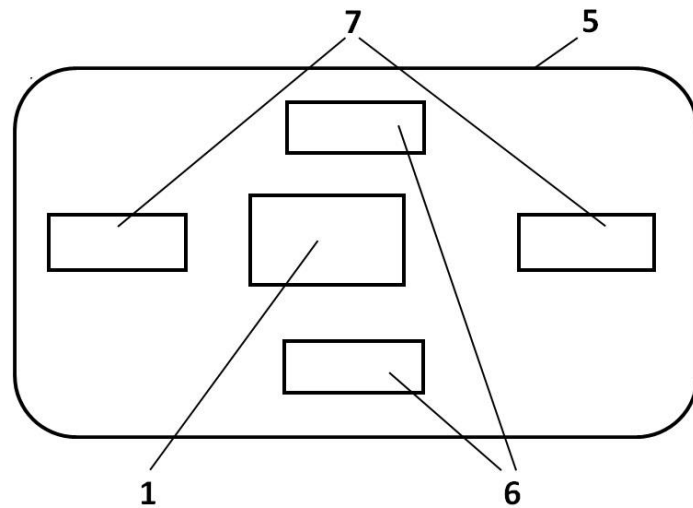
1) найкращі результати одержані при  $k=10$ .

2) якщо ж перерегулювання і час устанавлення є небажаними, то необхідно змінити форму годографа  $G(j\omega)$  на діаграмі рис 16.19.

В технологічній системі транспортування готової продукції інтелектуального підприємства використовують транспондери, зовнішній вид якого наведено на рис. 16.20.



а)



б)

**Рисунок 16.20. Автоматично керований засіб-транспондер для перевезення контейнерів з хлібом на склад**

а) загальний вигляд транспондера

1 - візуальний датчик;

2 - вбудований в підлогу сенсор-бірка транспондера;

3 - візок;

4 - бункера з хлібом;

5 - акумуляторний відсік;

6 - колеса ведучі;

7 - регулююче колесо;

б) структурна схема керування.

В табл.16.3. наведено результати дослідження якості системи керування транспондером

Таблиця 16.3.

## Показники якості при різних значеннях К

К	4,44	10	20
Відносне перерегулювання, %	32,4%	48,4%	61,4
Час устанавлення, с	4,94 с	5,46	6,58
Час максимума перехідної характеристики, с	1,19	0,88	0,67
$e_{ss}$	31%	16,79%	9,1%

Відносне перерегулювання визначено за формулою:

$$В. П. = \frac{M_p - M_{к.з}}{M_{к.з}} \cdot 100\%, \quad (16.61)$$

де  $M_p$  – максимальне значення перехідної характеристики;  $M_{к.з}$  – кінцеве значення (інколи  $M_{к.з} = 1$ ).

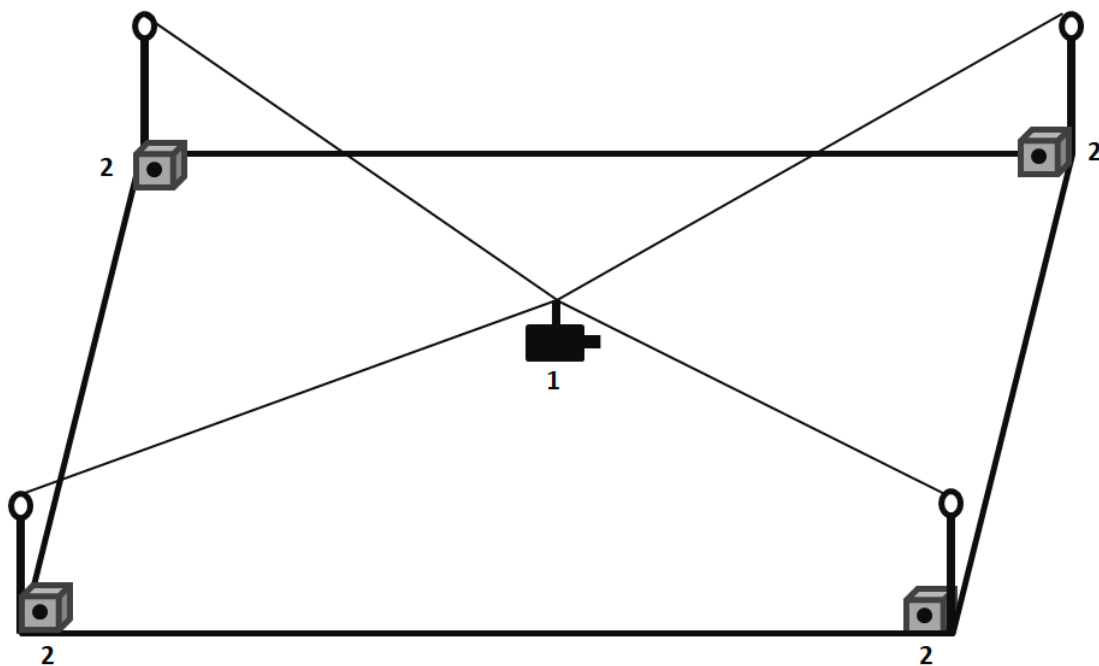


Рисунок 16.21 Дистанційна система керування відеокамерою  
1- камера візуалізації; 2 – привід важеля.

В системі оптимальними параметрами є:  $\tau_1 = 20 - 25 \text{ мс}$ ;  $\tau_s = 2 \text{ мс}$ ;  $D(p)$  – збурення компенсовано при  $K=11$ .

Система керування приводом кожного важеля ідентифікована рівнянням виду:

$$G_B(p) = \frac{10}{p(p+1)(0.1p+1)}, \quad (16.62)$$

Таким чином, розроблені системи автоматизованого керування локальними технологічними операціями в подальшому будуть об'єднані в систему інтелектуального управління технологічними процесами виробництва хліба.

#### **16.4. Інтелектуальна фабрика з виробництва хлібобулочних виробів**

Сучасний стан хлібопекарської галузі в Україні характеризується пропозицією значного асортименту хлібобулочної продукції з надійним її постачанням. В умовах масштабного та масового виробництва харчову безпеку та відповідність системі НАССР можна забезпечити за рахунок впровадження новітніх систем інтелектуального управління виробничими процесами з використанням робототехніки та впровадженням технологій штучного інтелекту [30].

Незважаючи на те, що сьогодні розповсюджені впровадження інноваційного обладнання хлібопекарень, інтелектуалізація процесів виробництва хлібобулочних виробів, на наш погляд, не достатньо вивченими залишаються такі питання, як:

- цифровізація виробничих процесів;
- управління життєвим циклом продукції з лікувально-профілактичними властивостями;
- розробка алгоритмів управління інтелектуальним виробничим процесом з виробництва хліба для територіях з техногенним тиском і перевищеним рівнем CO<sub>2</sub> [1,46].

Це пояснюється, зокрема, відсутністю надійних проєктних рішень щодо розробки технологічного обладнання з робото-технічними пристроями в системі «опара → тісто → випікання», що підтверджує необхідність їх детального вивчення.

Аналіз публікацій вітчизняних вчених Соколова А.В., Лисовенка А.Т., Мирончука В.Г., Шаруди С.С., Гавриша Т.В. свідчить про недостатньо розглянуті питання комп'ютерного моделювання процесу випікання хлібу та робочих характеристик операційної системи «опара → тісто → випікання».

Викладене вище зумовлює актуальність обраної теми проєктних рішень, спрямованих на розробку технологій та обладнання з цифровим управлінням виробництвом хлібобулочних виробів в системі інтелектуальної фабрики з виробництва хлібобулочних виробів.

Темою даного розділу є удосконалення конструкції технологічного обладнання для виробництва хлібобулочної продукції за рахунок використання інтелектуальних систем управління та ультразвукових технологій.

Сьогодні ринок обладнання для хлібозаводів формується в єдиному інформаційному полі з ринком хлібобулочних виробів та ринками інших галузей: харчової промисловості з подібними технологічними процесами, металургії та металообробки, машинобудування, хімічної промисловості,

цифрових технологій та засобів зв'язку. Також на ринок хлібопекарського обладнання значною мірою впливає мережа проміжних та кінцевих споживачів хлібобулочної продукції [36].

Структура ринку визначається стадіями технологічного процесу виробництва хліба за асортиментними групами та їх розподілом між суб'єктами ринку хлібобулочних виробів різного рівня.

Основними характеристиками ринку хлібопекарського обладнання є:

1. Складність інформаційного поля, що допускає величезну кількість взаємодій з іншими галузевими кластерами. Але це сприяє розвитку бізнесу за рахунок трансферу технологій із суміжних сфер знань та створює умови розвитку виробництва безпечних продуктів харчування для промислових регіонів з техногенним навантаженням. Це обумовлено значною кількістю технологічних процесів, що використовуються у виробництві хлібобулочних виробів (транспортування рідких і сипучих компонентів, гомогенізація сумішей, ферментація при приготуванні тіста, формування тістових заготовок, випікання та довипікання, нарізання, охолодження та заморожування, пакування, первинне та вторинне транспортування напівфабрикатів та готової продукції, завантажувально-розвантажувальні операції тощо.

2. Ринок носе інтернаціональний характер. Деякі українські хлібозаводи побудовані за участі фахівців з Німеччини, Італії, Франції, США. Компанії цих країн забезпечують продаж та постачання технологічного обладнання з подальшим технічним обслуговуванням, навчання персоналу, інформаційно-роз'яснювальну роботу серед споживачів тощо. Така кооперація дозволяє значно знизити ризики, пов'язані з наявністю на ринку великої кількості конкурентів, а також залежністю виробників хліба від постачальників борошна, питної води, інших інгредієнтів, енергоносіїв та з обслуговуванням обладнання.

3. Суттєвий вплив на ринок здійснює динамічний характер розвитку галузі та зміни попиту населення, розширення асортименту та зростання показників якості хлібобулочних виробів, залежність від зовнішньоекономічних показників, які впливають на купівельну спроможність.

Порівняльний аналіз рівня світового обладнання та обладнання, яким оснащені хлібозаводи України, показав, що українські машинобудівників потребують державної підтримки з точки зору розробки смарт- заводів з виробництва хліба. У першу чергу це пов'язано з недостатньою підтримкою дослідницько-конструкторських робіт, які вимагають значних витрат. Проте їх виконання пов'язане з ризиками в умовах невизначеності щодо одержання обладнання світового рівня.

Створення інтелектуальних підприємств сьогодні є одним із головних світових трендів, який значною мірою стимулюється швидким зростанням кількості інформаційних ресурсів та послуг, як надаються в сфері Інтернету речей (або англійською «Internet of Things», скорочено – IoT). IoT – це концепція комунікації об'єктів («речей»), які використовують технології для взаємодії між собою та з навколишнім середовищем. Також ця концепція передбачає виконання пристроями певних дій без втручання людини. Таким чином, всі пристрої в будинках, в автомобілях, на користувачах виконують

обробку інформації, її аналіз та обмін між собою та, залежно від результатів, приймають рішення і виконують певні дії [28].

У наш час висока конкуренція на товарних ринках стимулює підприємства до об'єднання з метою виживання. Віртуальне підприємство можна визначити як кооперацію юридично-незалежних організацій та індивідуумів, які виконують певні технологічні процеси, виробляють продукцію та надають послуги в межах загального бізнес-процесу. У зовнішньому світі віртуальне підприємство виступає як єдина організація, у якій використовуються методи управління і адміністрування, основані на використанні сучасних Інтернет технологій, цифрової економіки та інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ).

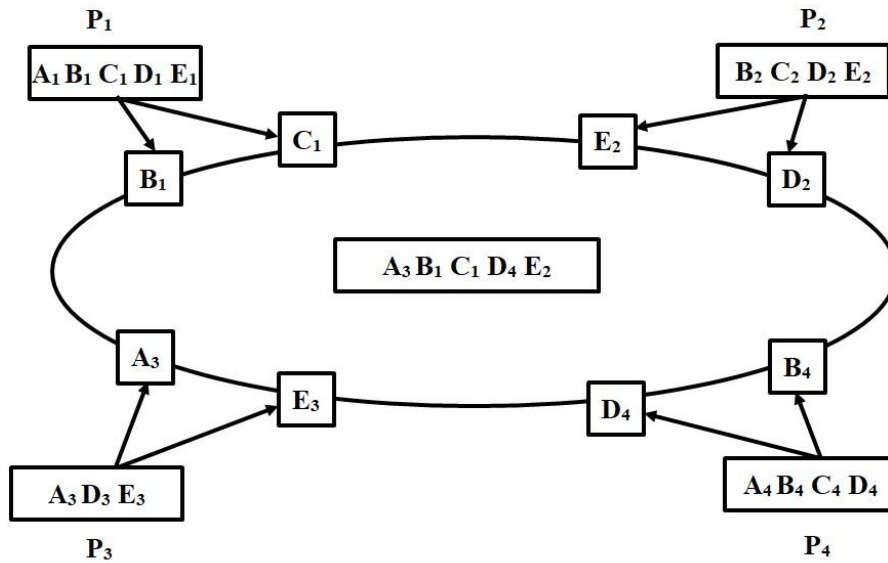
Таким чином, метою створення віртуального підприємства є об'єднання виробничих, технологічних, інтелектуальних та інвестиційних ресурсів для розробки і просування на ринок нових товарів і послуг. Оскільки кожне реальне підприємство в рамках віртуального виконує лише частину робіт із загального технологічного ланцюга, то при його створенні вирішуються два головних завдання:

- 1) декомпозиція загального бізнес-процесу на компоненти (підпроцеси);
- 2) вибір раціонального складу реальних підприємств-партнерів, які будуть виконувати технологічний процес.

Перше завдання може бути вирішено з використанням методів системного аналізу. Для рішення другого можуть бути використані засоби мультиагентних технологій.

Завдання оптимального розподілу загального комплексу робіт (підпроцесів) серед багатьох співробітників (підприємств) у дослідженні операцій формується як задача про призначення [36,49]. Її рішення розпочинається з формування множини процесів, далі здійснюється вибір найбільш раціонального відображення, яке відповідає конкретним призначенням підприємств щодо бізнес-процесів. З цією метою використаємо механізм аукціону.

На рис. 16.22. наведено схему аукціону щодо створення інтелектуального підприємства, в якому виділено бізнес-процеси А, В, С, D, Е. У реалізації цих бізнес-процесів приймають участь чотири технологічні лінії (підприємства) з виробництва хлібобулочних виробів:  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$ , які претендують на їх реалізацію. Кожне підприємство представлене інтелектуальним агентом, при цьому одне з них ( $P_1$ ) виступає в ролі ініціатора (аукціонера). Перед початком аукціону аукціонер (менеджер) формує базу даних і базу знань про учасників аукціону. Потім він виставляє на продаж окремі бізнес-процеси, інформація про які представлена стартовою ціною та вимогами щодо заданого вибору показників. Кожен з претендентів представляє власні пропозиції щодо параметрів, які він може забезпечити та вартості роботи. Після збору та обробки інформації щодо пропозицій аукціонер за допомогою певної моделі роздумів упорядковує потенціальних претендентів з урахуванням власної інформації про них. Після цього він приймає рішення про вибір призначень або відкидає їх і висуває нові пропозиції.



**Рисунок 16.22. – Схема створення інтелектуального підприємства**

**Будемо описувати роботу інтелектуального підприємства моделлю виду:**

$$(S, P, Eff, A, Prog, Arch, G, E), \quad (16.63)$$

де  $S$  (sensor) – множина входів за допомогою яких агент аналізує інформацію із зовнішнього середовища;

$P$  (perceps) – інформація, яку одержує агент;

$Eff$  (effectors) – множина виходів, за допомогою яких впливає на зовнішнє середовище;

$A$  (actions) – реакція агента;

$Prog$  (program) – функція, яка визначає залежність реакції агента від вхідних впливів ( $Prog: P \rightarrow A$ );

$Arch$  (architecture) – фізична оболонка, яка об'єднує всі базові елементи агенту;

$G$  (goal) – цілі, які досягаються агентом;

$E$  (environment) – зовнішнє середовище, в якій функціонує агент.

Базова конструкція агента визначається такими характеристиками, як  $S$ ,  $Prog, Eff, Arch$ , а його змістове наповнення забезпечується чинниками  $P, A, G$ .

З метою виконання моніторингу робочих характеристик екологічно чистого хліба введемо поняття програмних агентів – спеціалізованих комп'ютерних програм, призначених для виконання певних функцій в системі інтелектуального управління фабрикою з виробництва хлібобулочних виробів.

Для створення інтелектуальної фабрики з виробництва хлібобулочних виробів необхідно побудувати систему моніторингу роботи її ділянок: підготовки інгредієнтів, просіювання (борошна); приготування опари; приготування тіста; процесу випічки хліба в роторних печах; логістики і взаємодії зі споживачами (магазинами, торговими посередниками, закладами

ресторанного господарства тощо). Моніторинг здійснюється в режимі реального часу (on-line) за допомогою IoT.

За концептуальну основу моделі системи аналізу характеристик обладнання та технологічного процесу виробництва хлібобулочних виробів нами прийнято нейромережу прямого розповсюдження інформації. Вона складається з вхідного, вихідного та одного або декількох проміжних шарів нейронів.

Вихід нейрона в шарі  $n+1$  визначається відношенням:

$$y_j^{n+1} = f(S_j^{n+1}), \quad (16.64)$$

де  $n+1$  – номер шару;

$j$  – індекс нейрона в шарі  $n+1$  ( $j=1, N_{n+1}$ ),  $N_{n+1}$  – кількість нейронів в шарі  $n+1$ ;

$f$  – активаційна функція шару  $n+1$  (у нашому випадку будемо використовувати сигмоїдальну активаційну функцію  $f(x)=1/(1+e^{-\alpha x})$ ), а для вихідного шару – лінійну  $f(x)=\alpha x$ ;

$y_j^{n+1}$  – вихід  $j$ -го нейрона шару  $n+1$ ;

$S_j^{n+1}$  – постсинаптичний потенціал  $j$ -го нейрона шару, який обчислюється за формулою:

$$S_j^{n+1} = \sum_{k=1}^{N_n} W_{jk}^{n+1} y_k^n + b_j^{n+1},$$

$$S^{n+1} = W^{n+1} \tilde{y}^n, \quad (16.65)$$

де  $W_{jk}^{n+1}$  – вагові коефіцієнти зв'язку  $K$ -го нейрона шару  $n$  із  $j$ -м нейроном шару  $n+1$ ;

$y_k^n$  – вихід  $K$ -го нейрона шару  $n$ ,  $\tilde{y}^n$  – розширений вектор з врахуванням порогу (bias-нейрона);

$b_j^{n+1}$  – bias-нейрон  $j$ -го нейрона шару  $n+1$ .

Основними завданнями моніторингу є регулярне отримання інформації про властивості борошна, опари, тіста та стан технологічного обладнання під час використання в режимі реального часу.

Інтелектуальні системи відрізняються спроможністю вирішувати задачі, що важко піддаються формалізації та структуруванню. Це обумовлено використанням різних методів моделювання міркувань з метою обробки символічної інформації.

Зазвичай, механізми міркувань будуються на правилах (Rule-based reasoning (RBR)), що використовуються в експертних системах продукційного та логічного типу [27,36]. При такому підході необхідно, перш за все,



сформулювати максимально повний набір закономірностей, що характеризують предметну галузь.

Може бути застосований і альтернативний підхід case-based reasoning (CBR), концепція якого полягає у навчанні за прикладами. У цьому випадку при проектуванні інтелектуальної фабрики з виробництва хлібобулочних виробів не обов'язково заздалегідь володіти інформацією про усі закономірності такого виробництва, проте потрібно мати достатню кількість прикладів, щоб певним чином налаштувати адаптивну систему управління виробничим процесом. Тобто така система підлягає попередньому навчанню. Після вона вже самостійно зможе одержувати необхідні результати з визначеним ступенем достовірності. Розглянемо приклад яким чином адаптивні системи управління роторною піччю використовують штучні нейронні мережі (ШНМ). Розглянемо їх принцип дії більш детально [1,13,50, 52].

Штучні нейронні мережі, ШНМ – це спрощенні моделі біологічних нейронних мереж.

ШНМ складаються зі штучних нейронів, які уявляють собою спрощену модель біологічного нейрона. Все, що робить штучний нейрон – це сприймає сигнали з багатьох входів, обробляє їх єдиним чином та передає результат на багато інших штучних нейронів, тобто робить те ж саме, що і біологічний нейрон.

Біологічні нейрони пов'язані між собою аксонами, місця стиків називаються синапсами. У синапсах відбувається посилення або ослаблення електрохімічного сигналу. Зв'язки між штучними нейронами називаються синаптичними, або просто синапсами.

Кожен синапс характеризується одним параметром – ваговим коефіцієнтом, залежно від його значення відбувається та чи інша зміна інформації, під час її передачі від одного нейрона до іншого. Саме завдяки цьому вхідна інформація обробляється і перетворюється в результат, а навчання нейронної мережі засноване на експериментальному підборі такого вагового коефіцієнта для кожного синапсу, який і призводить до отримання необхідного результату.

Таким чином, штучний нейрон є дискретно-безперервним перетворювачем інформації. Інформація, яка надходить на вхід нейрона, додається з обліком вагових коефіцієнтів  $W_i$ , сигналів  $x_i, i=1, \dots, n$ , де  $n$  – розмірність простору вхідних сигналів.

Потенціал нейрону визначається за формулою:

$$P = \sum_{i=1}^n W_i x_i, \quad (16.73)$$

Зважена сума сигналів (потенціал), що надходять, перетворюються за допомогою передатних функцій  $f(p)$  у вихідний сигнал нейрона  $Y$ , який передається іншим нейронам мережі, тобто  $Y=f(p)$ . Вигляд передатної (активаційної) функції є важливою характеристикою нейрона. У загальному

вигляді ця функція може бути граничною, лінійною або нелінійною.

Гранична функція пропускає інформацію лише у тому випадку, якщо алгебраїчна сума вхідних сигналів перевищує деяку постійну величину  $P^*$ .

У системах, оснований на прецедентах, бази знань (БЗ) зберігають опис конкретних ситуацій (прецеденти). Пошук рішень виконується на основі аналогій і включає такі етапи:

- 1) одержання інформації про поточну проблему;
- 2) співставлення одержаної інформації зі значеннями ознак прецедентів із БЗ;
- 3) вибір прецеденту із БЗ, найбільш близького до проблеми, що вивчається;
- 4) адаптація обраного прецеденту до поточної проблеми;
- 5) перевірка коректності кожного отриманого рішення;
- 6) внесення детальної інформації про одержання рішення до БЗ.

Прецеденти описуються множиною ознак, за якими будуються індекси швидкого пошуку. Проте у ряді систем, заснованих на конкретних випадках, на відміну від індуктивних систем, нечіткий пошук дозволяє отримати багато прийнятних альтернатив, кожна з яких оцінюється певним коефіцієнтом достовірності. Найбільш ефективними вважаємо рішення, адаптовані до реальних ситуацій, побудовані з використанням спеціальних алгоритмів.

Системи, що засновані на конкретних випадках, використовуються для поширення знань у системах контекстної допомоги.

Сховище даних – це інтегрований, узгоджений за часом та орієнтований на домен збір даних, що можуть бути використані у процесах прийняття рішень [1,8,36]. Інформаційні сховища відрізняються від інтелектуальних баз даних тим, що вони є сховищами значимої інформації, яка регулярно отримується з оперативних баз даних.

Орієнтація на об'єкт означає, що дані згруповані за категоріями та зберігаються відповідно до ділянок (галузей), які вони описують, а не додатків, які їх використовують.

У сховищі дані інтегруються для того, щоб задовольнити вимоги не окремих функцій бізнесу, а компанії в цілому.

Прив'язка даних до часу означає, що атрибут часу завжди чітко означений в структурі сховищ даних та обумовлює їх «історичність».

Інваріантність означає, що дані, які знаходяться в структурах зберігання, більше не змінюються на відміну від операційних систем, де дані присутні тільки в останній версії і, отже, постійно змінюються.

Технології вилучення знань зі сховищ даних засновані на методах статистичного аналізу і моделювання, орієнтованих на пошук моделей і зв'язків, які приховані в наборі даних.

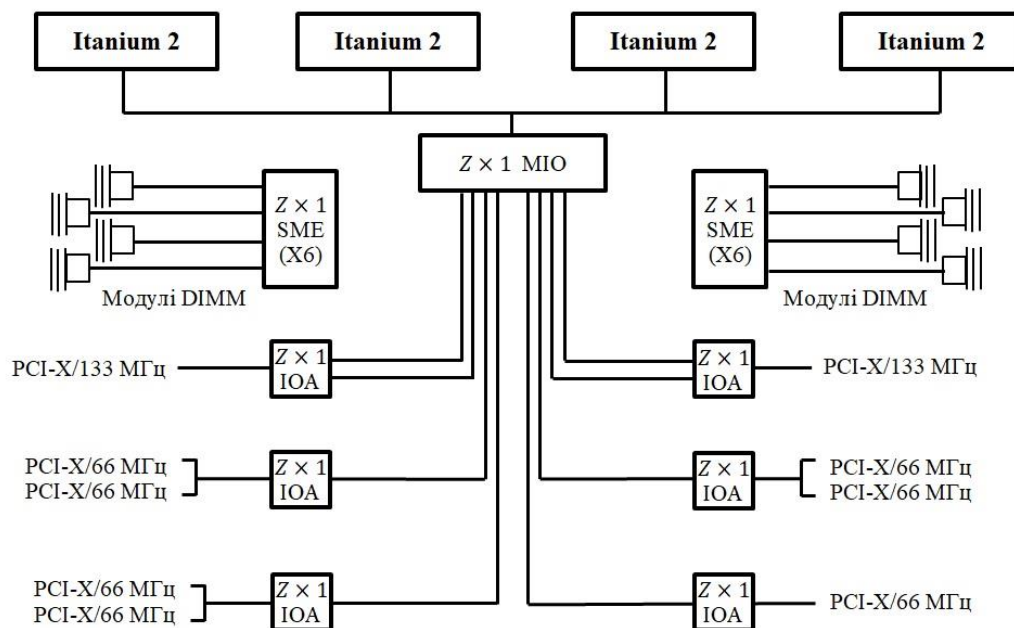
Такі моделі можуть в подальшому використовуватися для оптимізації діяльності компаній.

Для отримання значущої інформації зі сховищ даних користуються спеціальними методами аналізу: OLAP, Data Mining або Knowledge Discovery).

Вони засновані на використанні нейромереж, методів математичної статистики та індуктивних методів для побудови дерев рішень, тощо.

Спроекуємо архітектуру системи інтелектуального управління виробництвом хлібобулочної продукції для територій Дніпропетровської області, яка відрізняється значним техногенним навантаженням.

Основу системи моніторингу складає чотирьох-процесорний сервер на базі мікропроцесора (МП) Itanium 2 та чипсета HPzx1 (рис. 16. 23).



**Рисунок 16.23. – Структурна схема чотирьох-процесорного сервера на базі МП Itanium2 та чипсета HPzx1**

До структури також входять такі агенти:

- A1 – інкапсулює інтерактивну модель користувачів АРМ1, АРМ2 (відповідно, ділянки підготовки борошна та інших інгредієнтів системи опара→тісто→випікання), працює в реальному масштабі часу (on-line user agent);

- A2 – інкапсулює сеансову модель користувачів АРМ1, АРМ2, працює в автономному режимі (off-line user agent);

- A3 – контролер (Controler Agent), керує роботою АРМ1, АРМ2, АРМ3.

В архітектурі інтелектуальної системи управління виробництвом ІСУВ на вході розміщується база даних (DataBase), що містить інформацію стосовно існуючих моделей.

Агент А1 призначений для визначення аномальних режимів роботи обладнання хлібозаводу шляхом оцінки: G – аномальних ситуацій; P – послідовності команд; A – прогнозування розвитку ситуації в системі підготовки сировини (борошна) до виготовлення опари та тіста.

Prog: P → A – збір даних про стан та робочу діяльність обладнання та оператора, прогнозування якості борошна, стану опари-тіста і готовності тіста до операції випічки та прогнозування команд з використанням нейромережі (рис. 16.26).

Агент А2 оцінює роботу оператора в он-лайн режимі з інтервал часу 0,1 шляхом визначення відхилень робочих характеристик обладнання від норми.

Агент А3 – контролер, який відповідає за функціонування процесу виробництва хліба в цілому і керує роботою інших агентів.

У представленій моделі Prog:  $P \rightarrow A$  відповідає за створення різних типів агентів, отримання інформації з бази даних параметрів моделі, навчання та адаптацію нейромереж.

Це дозволяє агенту А3 працювати з користувачем у діалоговому режимі, а саме: отримувати інтегральні дані про техногенність території, рівень її забруднення та, у залежності від цього, надавати рекомендації щодо виробництва того чи іншого різновиду хлібобулочної продукції з функціональними (дієтичними, лікувально-профілактичними) властивостями.

У процесі функціонування А3 регулярно поповнює бази даних та знань відповідною інформацією, наприклад, новими відомостями про споживачів хліба, які проживають та/або працюють на території з техногенним тиском. Таким чином, у загальній базі даних зберігається вся інформація, необхідна для функціонування інтелектуальної системи управління підприємством.

Система нейромережевого моніторингу технологічного процесу виробництва хлібобулочної продукції для населення, що проживає на території з техногенним тиском, побудована на основі мобільних агентів, які відрізняються спроможністю до динамічного поведіння в мережі. Технологіями реалізації в програмному середовищі мобільних агентів були обрані Java й Aglets Software Development Kit (ASDK).

Програми на Java транслуються в байт-код Java, який виконується віртуальною машиною Java (JVM) – програмою, що обробляє байтовий код та передає інтерпретовані інструкції обладнанню. Перевагою такого способу виконання програм є повна незалежність байт-коду від операційної системи та обладнання, що дозволяє виконувати Java-додатки на будь-якому пристрої, для якого існує відповідна віртуальна машина.

Комплект для розробки програмного забезпечення ASDK є основою та середовищем для розробки та запуску мобільних агентів (аглетів). Сучасна версія такого програмного забезпечення від компанії IBM характеризується зручним графічним інтерфейсом користувача, який забезпечується сервером аглетів Tahiti, та простою, прозорою структурою. Особливістю цієї версії програмного забезпечення також є спеціально розроблений стандарт MASIF (Mobile Agent System Interoperability Facility) для забезпечення взаємодії між різними агентними системами.

Розглянемо природу поведіння аглетів більш детально. У загальному випадку це об'єкти Java, які можуть переміщатися з одного комп'ютера мережі на інший. Під переміщенням аглета розуміють передачу програмного коду зі збереженням стану агента, тобто значень його атрибутів. Таким чином, якщо агент виконує деякі дії на одному комп'ютері, то у будь-який момент він може зупинитися, переміститися на інший і продовжити там свою роботу.

Базова функціональність аглетів визначається програмним інтерфейсом Application Programming Interface (API). Для забезпечення мобільності агентів

(переміщення на віддалені комп'ютери) ASDK використовує модель подій (event model).

Так, агент 3, у цьому випадку, керує роботою комп'ютерного обладнання систем управління випічкою хліба у роторній печі, оцінюючи ситуацію  $\{S_n\}$  – події щодо оцінки якості газу і роботи САР співвідношенням «газ-витрати-повітря» / якість хліба / витрати енергоресурсів. Ці ситуації в керуванні випічкою хліба можуть бути реалізовані через інтерфейс com.ibm.aglet.event, Mobility Listener (він відповідає за обробку подій, пов'язаних з оцінкою роботи роторної печі і замовленням інноваційних різновидів хлібу).

Пропонована система моніторингу режимів приготування тіста, випікання хліба та контролю продуктивності технологічного обладнання може бути реалізована на основі клієнт-серверної архітектури.

Остання розробка, процесори Itanium 9560 MP, орієнтовані на вирішення завдань інтелектуального управління, таких, як планування ресурсів підприємства, управління ланцюгами поставок, управління взаємовідносинами з клієнтами (розумні магазини), інтелектуальний ремонт і управління завантаженням обладнання ліній з виробництва хліба.

У нашому варіанті інтелектуальної системи управління виробництвом хлібобулочної продукції пропонується використовувати МП Itanium 2, які мають ряд переваг у порівнянні з аналогами: використання шести арифметикологічних пристроїв (АЛУ, ALU), чотирьох портів пам'яті, 64-бітові інструкції.

Комп'ютери на базі Itanium 2, а також відповідні комплекси чіпсетів HP2x2 є найбільш поширеними в класі бюджетних SMP-систем, побудованих на платформі IA-64.

Набір Zx1 має три типи мікросхем МІО (Memory Input/Output). Чіп МІО забезпечує інтерфейс з 128-бітною системною шиною Itanium 2, яка має максимальну пропускну здатність 6,4 ГБ/с з ОЗУ і контролером вводу-виводу. Чіп МІО підтримує 8 каналів вводу-виводу з пропускнуою спроможністю 500 МБ/с на канал. Внутрішня шина в МІО мінімізує трафік введення-виведення на процесорній шині, яка включає в себе дані, що записуються з кешу мікропроцесора на зовнішній пристрій. Шина ЦП не бере участі в передачі даних DMA. Контролер введення/виводу відповідає за передачу даних в інтерфейсі шини Itanium 2. Конструкція МІО використовує до чотирьох відповідних шин введення/виводу, що працюють на частотах від 100 до 266 МГц.

Для підключення адаптеру ІоА, який працює з високошвидкісними шинами, можливе об'єднання каналів введення/виводу. Ця інтеграція дозволяє створювати різні конфігурації підсистем вводу-виводу. Для адаптерів вводу-виводу Zx1 ІоА основне значення має можливість підключення 4 мостів PCI / PCI-X з пропускнуою спроможністю 1 ГБ/с кожен до контролера МІО. У ІоА є засоби підвищення продуктивності: буфери читання/запису, обладнання для зчитування з попередньою вибіркою, черги перерозподілу.

Мікропроцесорна система (MPS) являє собою функціонально закінчений продукт, що складається з одного або декількох пристроїв, основою яких є мікропроцесор.

MP характеризується великою кількістю параметрів і властивостей, оскільки він, з одного боку, є складним обчислювальним пристроєм, а з іншого – електронним пристроєм, продуктом електронної промисловості.

Як засіб комп'ютерної технології, він характеризується, по-перше, архітектурою, тобто набором програмного і апаратного забезпечення, що надається споживачеві, і, по-друге, мікропроцесором з системами команд і обробки даних, режимами адресації, регістрами, оперативною пам'яттю і зовнішніми пристроями. Може виконувати функції елемента управління в системі.

Універсальні мікропроцесори призначені для вирішення різних завдань цифрової обробки інформації, від інженерних розрахунків до роботи з базами даних, які не пов'язані жорсткими тимчасовими обмеженнями. Цей клас МП відомий найбільш широко. Він включає в себе наступні МП: сімейства процесорів Pentium від Intel і Athlon від AMD.

Універсальні МП розподіляються на мікропроцесори CISC і RISC.

CISC (обчислення з повним набором команд) – МП, які мають весь класичний набір команд з широко розвиненими режимами адресації операторів. Цей клас включає, наприклад, мікропроцесори типу Pentium.

RISC (обчислення зі скороченим набором команд) – МП, які використовують зменшену кількість команд і режимів адресації, таких як Alpha 21x64, Power PC і інші.

Однокристальні мікроконтролери (ОМК або МК) призначені для використання в системах промислової автоматизації та автоматичного управління. Це ВІС, які включають в себе всі пристрої, необхідні для реалізації цифрових систем управління з мінімальною конфігурацією: процесор, ЗП команд, ЗП даних, генератор тактових сигналів, програмовані пристрої для зв'язку зі зовнішнім середовищем (контролер/переривач, таймери/лічильники, різні порти введення/виводу), аналогово-цифровий перетворювач (АЦП), цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) тощо. До класу однокристальних мікроконтролерів відносяться МП серії VCS-51 фірми Intel та подібні мікропроцесори інших фірм, архітектура яких де-факто стала стандартом.

Процесори цифрової обробки сигналів, ЦОС (digital signal processor, DSP) – це клас спеціалізованих програмованих мікропроцесорів, призначених для маніпулювання в реальному масштабі часу потоком цифрових даних, наприклад, обробки звукових сигналів, розпізнавання образів і т. п. ЦОС працюють таким чином, що фізичний сигнал (неперервний у часі такий як: напруга, струм тощо) перетворюється в послідовність чисел, які потім підлягають обробці в обчислювальному пристрої. Оброблений цифровий сигнал, при необхідності, може бути перетворений назад у напругу або струм.

ЦОС мають багато спільних рис з однокристальними МП гарвардської архітектури, які відрізняються фізичним та логічним розділенням пам'яті програм та пам'яті даних, а також розвинутими можливостями роботи із зовнішніми пристроями. Проте в ЦОС присутні й риси універсальних МП, особливо з RISC-архітектурою, такі, як конвеєрна організація роботи, програмні та апаратні засоби для виконання операцій з плаваючою комою,

апаратна підтримка складних спеціалізованих обчислень, особливо множення.

Для реалізації багатомірного нечіткого логічного регулятора (БНЛР) на базі SCADA-систем, в якому запропоновано компенсацію взаємного впливу контурів регулювання з мінімізованим часом відгуку нами було запропоновано використати багатомірний пропорційний дискретно-логічний регулятор. У ньому відсутній автономний порівнювальний пристрій.

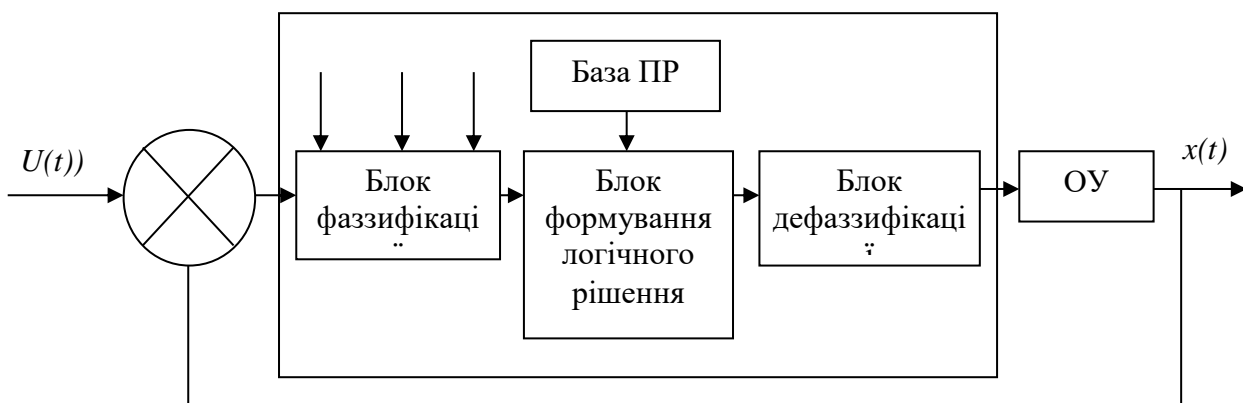
Порівняльний аналіз існуючих систем програмування промислових і ПК-логічних контролерів (Trace mode softologic, Simatic step 7, Rslogix 500 тощо) дозволив нам віддати перевагу системі Simatic step 7 – пакету програмного забезпечення компанії Siemens, яке призначене для розробки систем на базі програмованих логічних контролерів Simatic та інших з подібною архітектурою.

У процесі аналізу було встановлено наступне: для ефективної програмної реалізації БНЛР з чіткими термінами та змінними у вигляді сукупності аргументів двозначної логіки, необхідно розробити спеціальну систему автоматизованого проектування. Особливістю такої системи є універсальність та мінімізація часу відгуку, що сприятиме стабілізації вихідних параметрів роботи системи «насос – тістомісильна машина – сепаратор – робототехнологічний комплекс – інтенсифікатор».

У процесі розробки БНЛР запропоновано спосіб інтерпретації безперервних фізичних величин у вигляді еквівалентної сукупності чітких термінів. Новизна такого способу полягає у можливості вибору характеру і порядку розподілення чітких термінів на універсальній числовій осі, що дозволить розширити функції і сферу використання БНЛР.

У нашому випадку управління складним технологічним процесом випічки хліба запропоновано таку концепцію побудови ІСУ, в якій блок логічного виводу представлено у вигляді системи керованих впливів з механізмами формування ідентифікаційних номерів продукційних правил.

На рис.16.24 наведено структурну схему БНЛР.



**Рисунок 16.24. Структурна схема БНЛР.**

Такий спосіб дозволяє у кожному циклі сканування БНЛР не обробляти систему продукційних правил в цілому, а лише визначати те дійове правило, antecedent якого дорівнює логічній одиниці.

Це твердження опирається на той факт, що будь-яка безперервна фізична величина в кожний момент часу  $t$  може приймати одне і лише одне чітке значення, яке знаходиться усередині відрізка універсальної числової осі, який накривається відповідним чітким термом, значення якого у цей період часу дорівнює логічній одиниці.

Для нашого випадку одержано аналітичні вирази для розрахунку основних параметрів.

1. Кількість продукційних правил  $R$  БНЛР:

$$\begin{aligned} 1) R &= R_x \cdot R_y + 1; \\ 2) R_x &= K(X_1) \cdot K(X_2) \cdot \dots \cdot K(X_n); \\ 3) R_y &= K(Y_1) \cdot K(Y_2) \cdot \dots \cdot K(Y_k).. \end{aligned} \quad (16.74)$$

де  $R_x, R_y$  – кількість продукційних правил БНЛР, утворених  $n$ -вхідними і  $k$ -вихідними змінними  $X$  й  $Y$  відповідно;

$K(X_1), \dots, K(X_n)$  й  $K(Y_1), \dots, K(Y_k)$  – кількість чітких термів змінних  $X_1, \dots, X_n$  та  $Y_1, \dots, Y_k$  БНЛР відповідно.

2. Відсоток скорочення сумарного числа продукційних правил  $\Delta R$  БНЛР:

$$\Delta R = \left\{ 1 - \frac{\prod_{i=1}^n K(x_n) * \prod_{j=1}^k K(Y_k) + 1}{\prod_{i=1}^n (K(x_n) + 1) * \prod_{j=1}^k (K(Y_k) + 1)} \right\} * 100\% \quad (16.53)$$

3. Кількість операцій порівняння  $L$  БНЛР:

$$L = \sum_{i=1}^n (K(X_i) + 1) + \sum_{j=1}^k (K(Y_j) + 1). \quad (16.75)$$

У схемі формування ідентифікаційного номеру продукційного правила БНЛР  $K_1(X_1), K_2(X_2), \dots, K_n(X_n), R_1(Y_1), K_1(Y_2), \dots, K_k(Y_k)$  – порядкові номери чітких термів, значення яких дорівнює логічній одиниці в момент часу  $t$ , змінних  $X_1, X_2, \dots, X_n$  та  $Y_1, Y_2, \dots, Y_k$  БНЛР відповідно.

Структурна схема системи продукційних правил багатомірного чіткого логічного регулятора у нашому випадку буде складатись із регулюючої складової продукційного правила (відповідно РСПП та КСПП). Відпрацювання РСПП й КСПП виконується в кожному циклі сканування. Компенсаційна система продукційних правил дозволяє вирішити основну проблему синтезу БНЛР, тобто призначена для відокремлення в стійкому режимі взаємних впливів контурів регулювання.

Основними електронними системами ІСУ на основі БНЛР є:

$Z(t)$ -давальник  $Y(t)$  й  $U(t)$  – вектори регулюємих та регулюючих параметрів;

$X_B$  і  $Y_B$  – дискретні вхідні й вихідні сигнали багатомірного об'єкту керування (БОК) відповідно;



$TZY$  й  $Um$  – вектори термів задаючих, регулюємих й регулюючих параметрів відповідно.

Джерелом інформації при розробці системи продукційних правил багатомірного чіткого логічного регулятора є експериментально отримані залежності задаючого та регулюючого параметрів у автономному та зв'язаному режимах  $U_{mi}$ ,  $U_{ai}$  його роботи.

У зв'язку з тим, що до складу умовної частини продукційних правил БНЛР є можливість включити терми, як вихідних, так і вхідних змінних регулятора, інформацію для розробки компенсуючої системи продукційних правил нами запропоновано одержувати із двох або більше (за необхідності) експериментів при роботі БНЛР з об'єктом управління: тістомісильний апарат → роторна піч → система управління температурними режимами випічки хліба.

Геометрія камери випічки хліба може бути ідентифікована таким рівнянням:

$$U_{ki} = U_{mi} + U_{ai}. \quad (16.76)$$

Функція  $U_{ki}$  є закономірним відображенням експериментально одержаної функції відносно осі абсцис. В процесі дослідження доведено, що при точному відображенні функції  $U_{ki}$  повністю компенсує вплив  $(n-1)$  рівнів на  $i$ -й контур регулювання БНЛР.

Авторами роботи [1] було проведено спеціальний експеримент з впровадження БНЛР у процес управління стадією випічки хліба. У даному експерименті було проведено кількісну оцінку мінімізації відгуку БНЛР. В процесі було доведено, що середній відсоток збільшення швидкості дії багатомірної ІСУ при використанні БНЛР буде змінюватися в діапазоні (25...35)%, у залежності від сумарної кількості чітких термів безперервних фізичних величин  $K$ .

У процесі впровадження БНЛР виникла проблема реалізації програмного забезпечення функціональних блоків (фаззифікаторів і дефаззифікаторів) БНЛР STEP-TIM алгоритму фаззифікації на мовах програмування стандарту ІЕС 61131-3 в інструментальному середовищі розробки TRACE MODE 6.0 TASIMATICSTEP 7.

У процесі проведення експерименту були отримані аналітичні залежності для розрахунку максимального і мінімального поточних ідентифікаційних номерів продукційного правила БНЛР:

$$N_m^{max} = R - 1$$

$$N_m = (K(P_1) - 1) * K(P_2) * ... * K(P_N) + ... + (K_t(P_{N-1}) - 1) * K(P_N) + K_t(P_N), \quad (16.77)$$

де вектор  $P$  описує сукупність  $n$ - вхідних та  $K$ - вихідних змінних  $X$  й  $Y$  БНЛР відповідно;

$K_t (P_N)$  – номер терма-змінної  $P_N$ , значення якого дорівнює логічній одиниці в момент часу  $t$ ;

$K(P_N)$  – кількість чітких термів змінної  $P_N$ .

На основі цих досліджень та висновків розроблено концепцію семантичного аналізу структури програмного коду багатомірного чіткого логічного регулятора. Вона складається з шістьох положень, які передбачають детальну перевірку системи впливів керування на предмет наявності повторень, які є суперечними та взаємодоповнюють продукційні правила.

Автори роботи[1] використали універсальне програмне забезпечення для системи автоматизованого проєктування та розробки багатомірних логічних регуляторів зі змінними у вигляді сукупності аргументів двозначної логіки та компенсацій взаємного впливу контурів регулювання «САРБЧЛП». Система проєктування розроблена в інструментальному середовищі об'єктивно-орієнтованої мови програмування Embarcadero Delphi.

Розроблено інтелектуальну систему управління виробництвом хлібобулочної продукції, в якій аналіз збурень сировини, води та обладнання виконано за допомогою системи моніторингу робочих характеристик технологічного обладнання. Системи моніторингу робочих характеристик обладнання та якості води, сировини, опари, тіста виконано на основі агентських технологій, що дає можливість на базі нечітких регуляторів побудувати системи адаптивного керування комплексом приготування тіста і випіканням хліба та автоматизації його заморожування.

### ***Контрольні запитання***

1. *Навести основні характеристики інтелектуальної системи (ІС) та типові ситуації в АСУТП хлібокомбінату.*
2. *Поясніть, як працює нейромережева модель для задач класифікації і розпізнавання автомобіля з борошном.*
3. *Поясніть, за яким принципом працює схема автоматизації процесу виділення (очищення) борошна від магнітних частинок.*
4. *Поясніть, яким чином адаптивні системи управління роторною піччю використовуються штучні нейронні мережі (ШНМ).*
5. *Вкажіть відмінність системи нейромережевого моніторингу технологічного процесу виробництва хлібобулочної продукції для населення, що проживає на території з техногенним тиском.*
6. *Чому система керування будується на основі мобільних агентів, які відрізняються спроможністю до динамічного поведіння в мережі.*
7. *Чому для реалізації технології в програмному середовищі мобільних агентів були обрані мови Java й Aglets Software Development Kit (ASDK)?*
8. *У чому полягає компенсація взаємного впливу контурів регулювання з мінімізованим часом відгуку системи на зовнішні збурення сировини.*

9. Поясніть, чому для реалізації багатомірного нечіткого логічного регулятора (БНЛР) на базі SCADA-систем, запропоновано використати багатомірний пропорційний дискретно-логічний регулятор.
10. За яким принципом працює інтелектуальна система управління виробництвом хлібобулочної продукції?
11. Поясніть, яким чином необхідно враховувати збурення сировини, води та обладнання та як виконати це за допомогою системи моніторингу робочих характеристик?

## РОЗДІЛ 5. НЕЧІТКІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

### Тема 17. Системи нечіткого керування виробництвом продукції

#### 17.1 Поняття фазифікації та дефазифікації Нечіткі регулятори

Під дефазифікацією розуміють процедуру перетворення нечітких величин, одержаних у результаті нечіткого виведення, в чіткі. Ця процедура є необхідною у тих випадках, коли буде потрібна інтерпретація нечіткого виведення конкретними чіткими величинами, тобто коли на основі функції належності  $\mu_c(z)$  виникає потреба визначити для кожної точки в  $Z$  числові значення. На сьогоднішній день відсутня системна процедура вибору стратегії дефазифікації. На практиці чітко виконують два найбільш загальних методи: метод центра ваги (ЦТ - центральний), метод максимуму (ММ).

Для дискретного простору в центральному методі формула для обчислення чіткого значення вихідної змінної зображена у наступному вигляді:

$$z_{\text{ЦТ}} = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_c(z_j) z_j}{\sum_{j=1}^n \mu_c(z_j)}. \quad (17.1)$$

В загальному випадку

$$z_{\text{ЦТ}} = \frac{\int \mu_c(z) z dz}{\int \mu_c(z) dz}. \quad (17.2)$$

Стратегія дефазифікації ММ обумовлює підрахунок усіх тих  $z$ , чий функції належності досягли максимального значення. В цьому випадку (для дискретного варіанту) одержуємо

$$z_{\text{ММ}} = \sum_{j=1}^m \frac{z_j}{m}, \quad (17.3)$$

де  $z_j$  – вихідна змінна, для якої функція належності досягла максимуму;  $m$  – число таких величин.

Із тих двох найбільш частіше використовують стратегію дефазифікації, стратегія ММ дає кращі результати для перехідного режиму, а ЦТ – у встановлених режимах за рахунок зменшеної середньоквадратичної помилки. Технології фазифікації та дефазифікації використовують при проектуванні нечітких регуляторів [1, 8, 11, 17, 27]

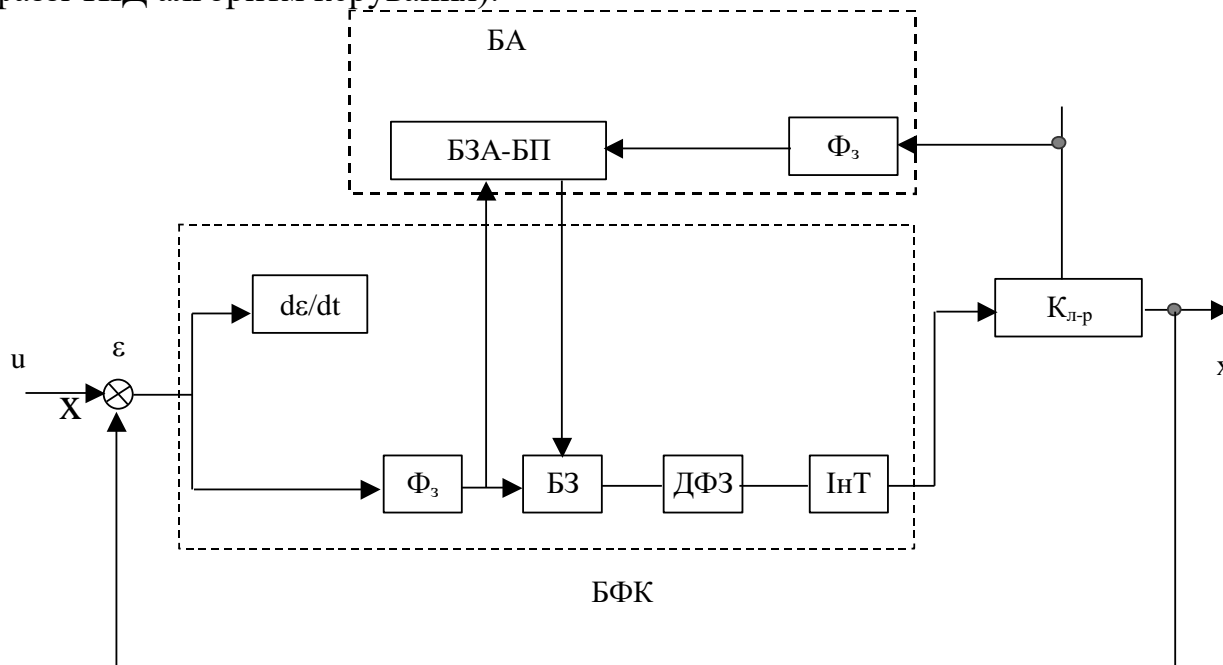
#### *Розглянемо принцип дії нечітких регуляторів в системах керування виробництва продуктів харчування*

Нечіткі або фаззі системи автоматичного керування (САК) знаходять зараз широке використання, у тому числі в якості САК стабілізації вихідних змінних у виробничих процесах харчових технологій. Вони можуть бути використані і як САК стабілізації і оптимізації технологічних процесів

фаззифікації та дефаззифікації виробництва продукції високої якості. При цьому фаззі-САК мають ряд важливих переваг [1,2,8,17,27] щодо типових САК з і ПД – регуляторами.

Якщо складні процеси виробництва продуктів здорового харчування віднести до квазінелінійних, то при керуванні ними кращі результати одержують тоді, коли проєктанти САК використовують фаззі-САК [17,43]. Технологічні процеси на хлібозаводах такі, як підготовка борошна, виробництва опари- тіста, його випікання та охолодження уявляють собою складні квазінелінійні об'єкти керування, а їх ідентифікація та автоматизація – предмет сучасних наукових досліджень, вимагає значних інвестицій щодо створення математичних моделей їх досліджень, доведення САК до виробництва. Для таких підприємств у процесі корпоративного переозброєння необхідно постійно проводити моніторинг сили борошна і постійного прогнозування зміни робочих характеристик тіста. Такі довготермінові збудження повинні бути враховані при проєктуванні фаззі – САК і які повинні адаптуватися в темпі з процесом надходження сирової руди на подрібнення. На рис.17.1 наведена типова блок-схема адаптивної фаззі-системи стабілізації густини опари зливу опарного апарату.

.Адаптація виникає при тривалих і значних змінних збуреннях характеристик борошна та дріжджів у порівнянні з їх стандартним значеннями, що потрібно враховувати при розрахунку САК. Основний блок фаззі-керування (БФК) адаптивної САК з пристроями керування (ПК) і фаззі-регулятором (фаззі-ПД алгоритм керування).



**Рисунок 17.1. Блок-схема адаптивної фаззі-системи стабілізації густини опари**

БФК – блок фаззі-керування адаптивної САК;

Φ<sub>3</sub> – фаззифікатор, БЗ – база знань; ДФЗ – дефаззифікатор, ІнТ – інтегратор, БПЛ – база правил логічних, К<sub>л-р</sub> – класифікатор - об'єкт керування (ОК), БА – блок адаптації

Блок фаззі-керування складається із фаззіфікатора (ФЗ), бази знань (БЗ) і дефаззіфікатора (ДФЗ).

На вхід ФЗ основного каналу САК (див. рис. 17.1) подаються сигнали помилки  $\varepsilon$ , при цьому  $\varepsilon=u-x$  і її похідної  $d\varepsilon/dt(\varepsilon=\varepsilon(t))$ ,  $x(x=x(t))$ ,  $y(y=y(t))$  є функціями часу (тут і в подальшому аргумент  $t$  опущений). Диференціатор  $d\varepsilon/dt$  є практично обов'язковим на вході фаззі-ПК, так як похідна в часі вхідної змінної, як правило, існує у так названих декларативних логічних правил БЗ. Інтегратор (ІнТ на рис.17.1.) доданий для введення інтегральної складової при проектуванні ПД-фаззі-алгоритмів. В нашій схемі ПД-фаззірегулятор встановлений паралельно основному каналу фаззі-САК,

У ФЗ вхідні змінні перетворюються у терм-множину, які зображені, як правило, у вигляді функцій належності (ФН). Наприклад, змінна помилки  $\varepsilon$  відображенням (ФН  $\mu_\varepsilon$ , її похідна  $\varepsilon' = d\varepsilon/dt$  - відповідно ФН  $\mu'_\varepsilon$  і т.п. ФЗ блоку адаптації (БА) перетворює сигнали від сенсорів збурень – елементів вектору  $\bar{f}$ . Наприклад,  $\bar{f}_1$  - густина опари, тобто параметри, що характеризують відсоток борошна в гетерогенному середовищі;  $f_2$  - важлива ознака, що характеризує запах опари і т.п.

Вектор  $\bar{f}$  повинен враховувати і інші параметри ОК (механічні, енергетичні та ін.). Вхідні сигнали тієї частини БЗ, яка виконує в САК функції адаптації (БЗА) і бази правил БП також складаються із змінних збурень і їх похідних.

Усі ФН, як правило, геометрично можуть бути зображені у лінійаризованому вигляді у формі трикутників, трапецій або синглетонів [1,8,20]. База знань (БЗ), база знань адаптації (БЗА) і база правил (БП) складається із логічних правил Якщо..., то..., розроблених експертами. Експертні правила зображені у вербальній (словесній) формі у вигляді термів терм-множин. На практиці терм-множини складаються не більше ніж із семи-десяти термів. Для зображення ФН терм-множин САК стабілізації густини опари, як правило, використовується шкала змінної з нулем посередині [13,48,49].

“Стандартний” набір термів у БЗ, наприклад, для нашого випадку має три позитивних і три від'ємних терма: (зліва направо) від'ємні: великий (ВВ), середній (ВС), малий (ВМ), в подальшому біля нуля (Н) і три позитивних: малий (ПМ), середній (ПС), великий (ПВ). У БЗІ крім ФН з індексами  $\varepsilon, \varepsilon'$  приймають участь також ФН з індексами змінних елементів вектора збурень  $\mu f_1, \mu f_2, \dots$ , або  $\mu f'_1, \mu f'_2, \dots$

Значення термів терм-множин, що надходять від ФЗ записуються в частину ЯКІЩО логічних правил ЯКІЩО...То. В частині ТО може фігурувати лише один терм  $\text{ФН}\mu_y$ , який часто зображують у формі синглетонів. У БЗ (включаючи БЗА) є також так звані процедурні логістичні правила [1,8,11]. Ці правила створені експертами, що приймають участь в програмуванні контролерів, які проєктанти використовують в якості апаратних засобів ПУ фаззі-САК.

Процедурні правила працюють при змінних режимах дії фаззи-САК і можуть мати в частині ЯКЩО такі умови, на основі яких в частині ТО буде, наприклад, сгенерована команда заміни одних правил і БЗ іншими, частково із БЗА. Блок БА включається в роботу при значних і тривалих змінах збурень. Для цього у БЗА необхідно контролювати час дії нерегламентованих збурень і визначати “критичні” проміжки часу для кожного збурення. Необхідність включення блока адаптації перевіряється по значенням (у динаміці) сигналів  $X$  і  $\varepsilon$ . Перед дією керування проводиться аналіз усіх збурень, тобто фактично аналіз впливу на САК середовищі. Це відрізняє адаптивну фаззи-САК від комбінованих фаззи-САК, які мають у своєму складі безперервно діючі фаззи-компенсатори [48].

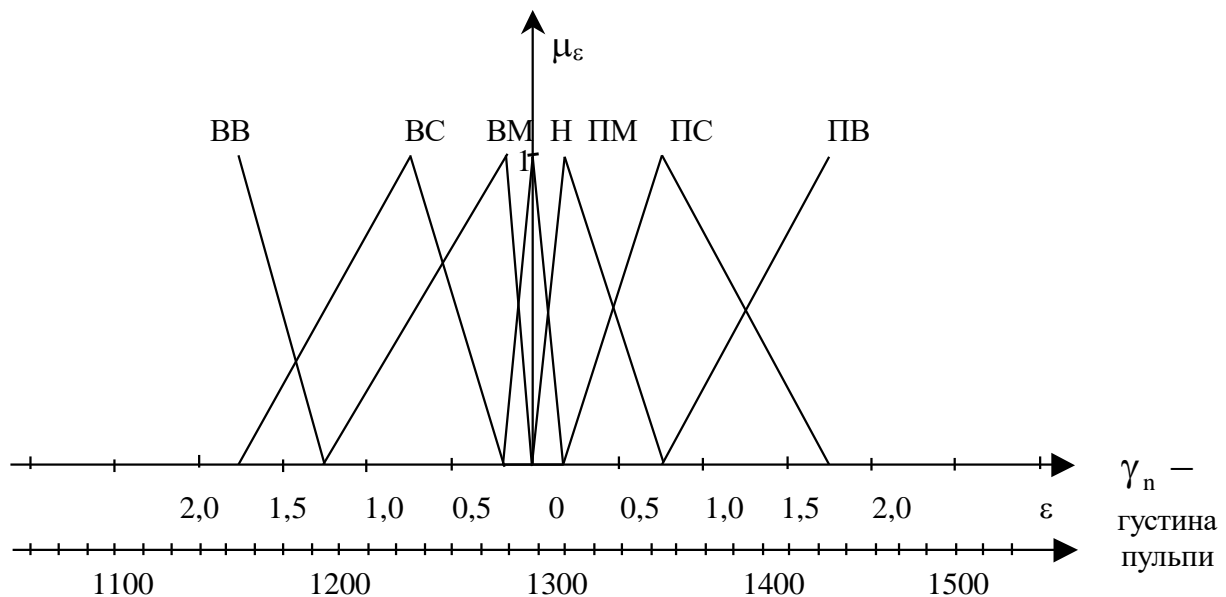
На рис.17.2 зображені графіки  $\mu_{\varepsilon}$ , які розділені на 7 термів і які лінеаризовані у вигляді трикутників.

Конфігурація трикутників вибрана таким чином, щоб статична характеристика ПК САК забезпечувала високі значення коефіцієнту підсилення  $K$  в області стабілізуемого (заданого) значення  $u$  по відношенню до інших значень  $\varepsilon$ . Таким же по формі і кількості виконується  $\mu_{\varepsilon}$  (графік кривих наведено). Терм-множину  $\mu_{\gamma}$  (рис.17.3) наведено у формі сінглетонів і має 9 термів. Додатково добавлені “спеціальні” терми ВДВ – від’ємний дуже великий і ПДВ – позитивний дуже великий, які збільшують вихідний сигнал – керовану величину  $Y$  в режимі адаптації фаззи-САК. За нуль (близько нуля) прийняте значення сигналу керування  $u$ , що відповідає завданню  $x=u$ ,  $\varepsilon=0$ . коефіцієнт підсилення ПК фаззи-САК можливо розрахувати, використовуючи методику наведену в [8,11].

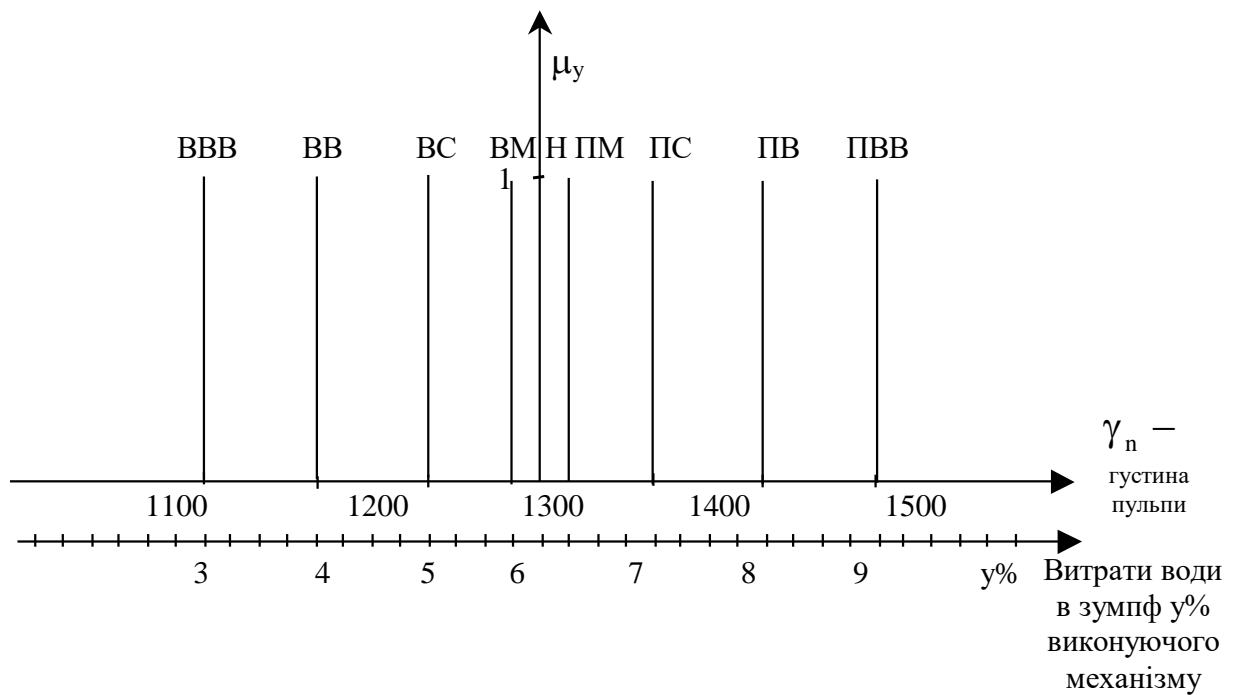
У дискретній формі для статичного режиму дослідного фаззи-САК (рис.17.2) при визначеній апроксимації можливо записати

$$Y_K = K_{\text{о} \varepsilon} \cdot \varepsilon_K, \quad (17.4)$$

де  $K=1/\Delta t$ ,  $\Delta t$  – постійна дискредитації,  $K=1,2,3\dots$



**Рисунок 17.2. Функція належності  $\mu_{\varepsilon}$  помилки керування  $\varepsilon$**



**Рисунок.17.3. Функції належності  $\mu$  керованому впливу  $y$**

Розрахунок коефіцієнтів підсилення фаззі ПУ проводиться по максимальним значенням термів ПУ  $\mu_\epsilon$  і  $\mu_y$  і  $y$  відповідності з рис.17.3, 17.4 по формулі

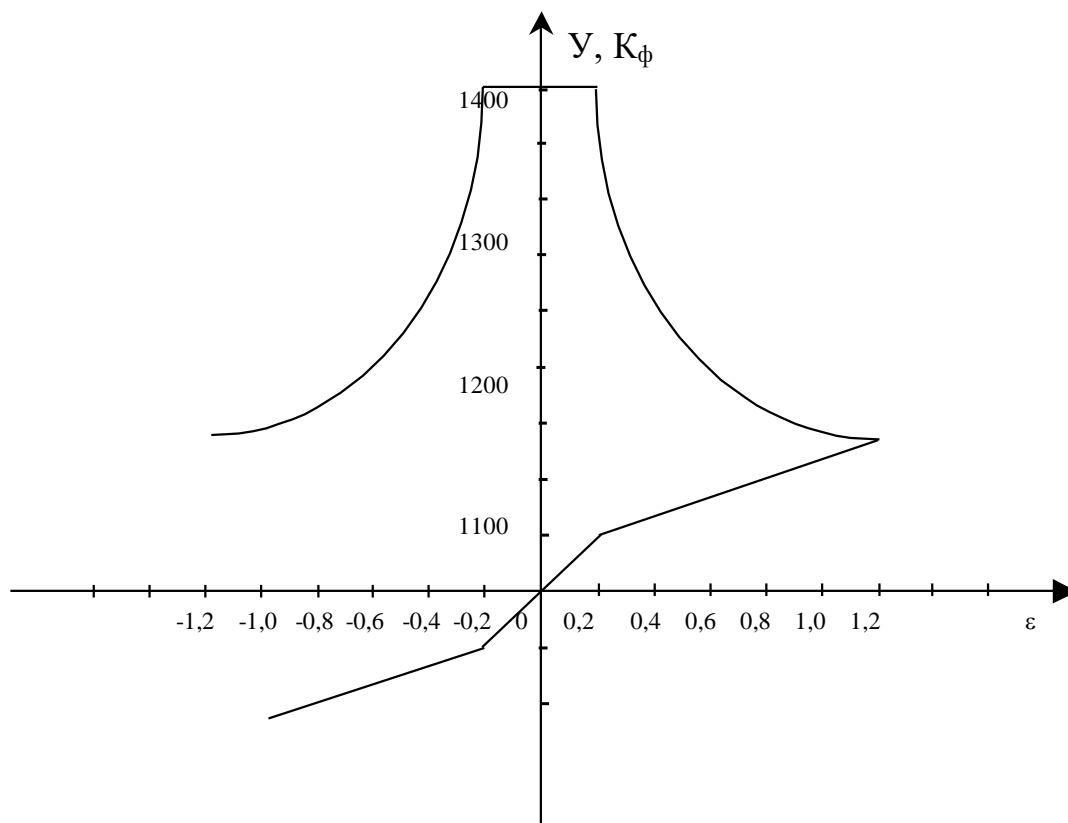
$$K_{\phi_k} = \frac{y_k}{\epsilon_k} \quad (17.5)$$

У розрахунках для терма Н (близько нуля)  $K_{\phi(0)}$  має граничні значення, тобто

$$K_{\phi(0)} = K_{\phi(-1)} = K_{\phi(+1)}. \quad (17.6)$$

На рис.17.4 наведені графіки функцій  $y=f_y(\epsilon)$  і  $K_\phi=f_k(\epsilon)$ . Перша із цих функцій повинна бути розрахована при обчислюванні необхідних технологічних характеристик (витрати електрики, матеріальний потік, вагові характеристики тіста і т.п.), керованих впливів ОК.





**Рисунок.17.4. Статична характеристика фаззі-САК**

Значення  $K_{\phi}$ , як видно із графіку  $K_{\phi}=f_{\kappa}(\epsilon)$ , зростає по мірі наближення  $x$  до заданого значення  $u$  і для термів ВМ, Н, ПМ досягає максимального значення, що підвищує якість регулювання, зменшуючи амплітуду вибігу стабілізованої величини  $x$ . Розрахунок цієї кривої проводиться, наприклад, по методу  $\max\text{-}\min$ [15,65], але для значень  $\epsilon$  біля нуля (смуга  $\epsilon=-0,1$  і  $\epsilon=+0,1$ ), а, отже, одержуємо  $K_{\phi}=1/0,1=10$  і для крайнього значення (наприклад, правої гілки)  $K_{\phi}=8/1,75=4,5$ . Можливість використання функції  $K_{\phi}=f_{\kappa}(\epsilon)$  для покращання динаміки системи – важливі переваги усіх фаззі-САК у порівнянні з класичними САК.

Для створення БЗ, тобто математичного (логічного) опису ОК і алгоритму керування САК, експерти, використовуючи формулу ЯКЩО..., ТО, записують ряд логічних (декларативних)правил.

Розглянемо спрощений випадок для БЗ-блоку БФК (див. рис.17.1) у частині ЯКЩО усіх формул ЯКЩО..., ТО присутні лише два терма:  $\text{ФН}\mu_{\epsilon}$  і  $\text{ФН}\mu_{\epsilon'}$ . Тому набір формул для БЗ блоку БФК можливо зобразити у вигляді матриці (див. табл. 17.1).

В строчках таблиці дані значення термів  $\text{ФН}\mu_{\epsilon}$ , а в стовпцях -  $\text{ФН}\mu_{\epsilon'}$ . На перехресті строк і стовпців записані терми результуючого терм-множини частини ТО, тобто  $\text{ФН}\mu_y$ . Верхній рядок у строчках – процес без адаптації, нижні строчки (курсив) – з адаптацією, тобто при роботі частини БЗА бази знань фаззі-САК.

Без адаптації при звичайному регламентному режимі ОК правило із

основної частини БЗ, наприклад, для першої (верхньої) строчки і другого (зліва) стовпця, має вид:

ЯКЩО  $\varepsilon=ВВ$  І  $\varepsilon'=ВС$ , ТО  $y=ПВ$ .

При роботі ОК в режимі регламенту частина БЗ-БЗА може довгий час невраховувати в роботі фаззі-САК. Одначе при значних і тривалих змінах збурень БА вступає в роботу. При цьому починають діяти також і процедурні правила. Наприклад, при значенні терма  $\Phi H_{\mu_{\varepsilon}}-BC$  і  $\Phi H_{\mu_{\varepsilon}}-PB$ , що відповідає ВМ для  $\Phi H_{\mu_y}$  і як результат (див. табл. 17.1), знизити помилку  $\varepsilon$  до значення ЗМ. Якщо через деякий проміжок часу для терма  $\Phi H_{\mu_{\varepsilon}}$  настає значення ВС і тоді включається “в роботу” БЗА.

Таблиця 17.1

**Алгоритм роботи фаззі-регулятора**

$\Phi H_{\mu_{\varepsilon}}$	$\Phi H_{\mu_{\varepsilon'}}$						
	ВВ	ВС	ВМ	Н	ПМ	ПС	ПВ
ВВ	ПВ пдв	ПВ пдв	ПВ пдв	ПВ пв	ПС Пв	ПМ пс	Н
ВС	ПВ пдб	ПВ пдв	ПВ пдв	ПС пв	ПМ Пс	Н	ВМ
ВМ	ПВ пдв	ПВ пс	ПС пв	ПМ пс	Н	ВМ	ВС
Н	ПБ пдв	ПС пс	ПМ	Н	ВМ	ВС	ВВ
ПМ	ПС	ПМ	Н	ВМ	ВС	ВВ	ВВ
ПС	ПМ пс	Н	ВМ	ВС	ВВ	ВВ	ВВ
ПВ	Н	ВМ	ВС	ВВ	ВВ	ВВ	ВВ

При синтезі правил для БЗА у частині ЯКЩО уже фігурують три, чотири (або більше) терма різних ФН. Наприклад, правило для БЗА:

ЯКЩО  $\varepsilon=ВВ$  І  $\varepsilon'=ВС$  І  $f_2=ПВ$ , ТО  $y=ПВВ$ .

Тут уже три умови і показати ряд правил у вигляді матриці не є можливим. Для наочності дій БЗА у приватному випадку реалізації цього правила, у табл.17.1 внесені умовно його терми частини ТО, тобто  $\Phi H_{\mu_y}$ , вони наведені у нижній строчці курсивом

**17.2. Автоматизовані системи виробництва копченої риби на базі нечітких регуляторів і робототехнологічних комплексів**

Постачання населення регіонів з техногенними територіями рибопродуктами високої якості і за доступними цінами залишається головним стратегічним напрямком розвитку рибопереробної промисловості України до 2035 року.

Проблему харчування населення криворізького мегаполісу необхідно розглядати з екологічними факторами з врахуванням їх впливу на здоров'я дітей, студентів, робітників підприємств гірничо-металургійного комплексу, які працюють та мешкають на забруднених територіях, а отже продукти здорового харчування повинні бути забезпечені лікувальними добавками.

Питанню розробки технологій виробництва здорового харчування з риби та вивчення впливу ультразвукових коливань на технологічне середовище рибних продуктів присвятили праці вітчизняні та закордонні вчені Г.М. Постнов, Н. Г. Гринченко, О. П. Тищенко, В.А. Гніцевіч, І.Е.Ельпінер, Й.О. Рогов, В.М. Горбатов, Ю.Ф. Заяс, В.М. Хмелєв, Б.Г. Новицький, О.А. Литвиненко, О.І. Некоз, П.М. Немирович, HaoFeng, GustavoV. BarbosaCánovas, JochenWeiss. Великий внесок у розвиток моделювання процесів харчових виробництв і показників якості харчових продуктів внесли І.М.Федоткін, Н.В. Остапчук, Є.Л. Алексеєв, Г.В. Дейниченко, Г.М. Постнов, М.А. Чеканов, В.М. Червоний, Д.А. Нечипоренко, Р. Ю. Павлюк, Яковлев та багато інших..

Успішне впровадження сучасних, цифрових методів виробництва продукції зі застосуванням робототехнологічних комплексів особливо ефективно при виробленні широкого асортименту рибних продуктів. Саме рибні продукти дуже корисні для смарт-харчування гірників, дітей та воїнів ЗСУ за рахунок вітаміну Д (риб'ячий жир, печінка тріски, горбуша, мінтай тощо) та захисту населення забруднених територій у боротьбі з хворобами серцево-судинних захворювань. Експерти з питань харчування рекомендують вживати вітамін Д кожного дня робітникам підземних професій в дозах від 42 до 100 нмоль/л.

Виробництво рибних продуктів в полі імпульсних ультразвукових коливань із застосуванням робототехнічних комплексів дозволяє значно підвищити нутрієнтну адекватність та якість продукції.

У зв'язку з розвитком робототехніки з інтелектуальним рівнем взаємодії виконавчих механізмів з гетерогенним середовищем і автоматизації технології, з'явилася можливість використовувати морські рибні продукти,

корегуючи якість таких виробів за допомогою технологій соління та копчення в полі імпульсних ультразвукових коливань.

Таким чином, дослідження і впровадження технологічного обладнання для виробництва рибних продуктів зі збагачувальними добавками із застосуванням робототехнологічних інтенсифікаторів є актуальною і практично важливим завданням для науковців харчової галузі.

**Метою одержання знань ЗВО цієї важливої теми підручника є:**

- удосконалення обладнання та технології процесів соління- копчення з використанням імпульсного ультразвукового впливу на продукт, виконаного у вигляді робототехнологічного комплексу продуктів смарт- харчування для регіону з техногенними забрудненнями

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

1 Дослідити технологічне обладнання копчення риби з використанням робототехнологічних інтенсифікаторів як об'єкта робототизованого керування ;

2. Побудувати математичні моделі взаємодії ультразвукових імпульсних впливів на рибний продукт та побудувати нелінійні моделі керування процесом;

3. Оцінити якість готової продукції за органолептичними, фізико-хімічними показниками якості та автоматизованого керування процесом копчення

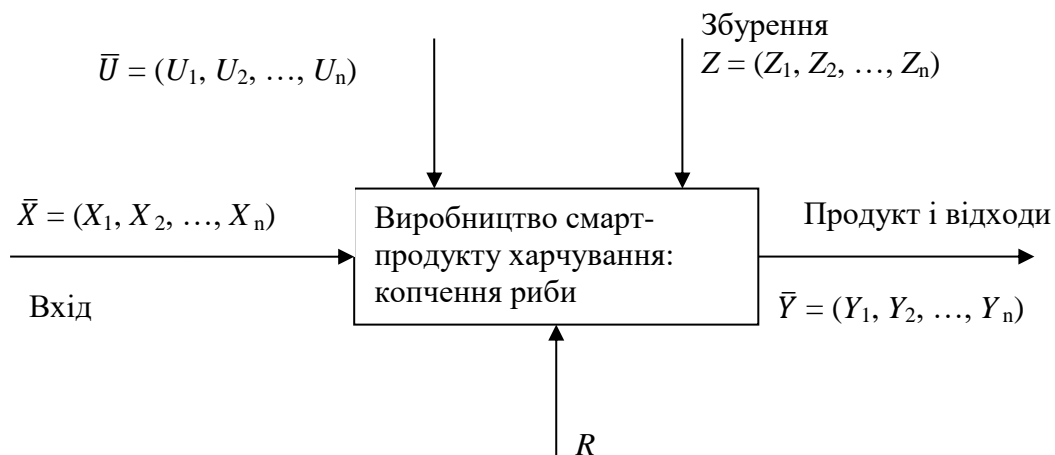
Технологічна операція копчення – це технологічний процес консервування риби, який сповільнює псування рибних продуктів харчування.

З метою вивчення цих технологічних нелінійних процесів, як об'єктів керування звернемо увагу на необхідність контролю параметрів коптільного диму, температурних режимів тощо.

При проектуванні робототехнологічних комплексів необхідно одержати раціональні режими копчення: 1- температура коптільного диму-373,...,403К; 2. швидкість коптільного диму-0,1...0,5 м/с; 3. – волога – 40-60%;

4. характерний розмір риби-3,0-5,0.

Модель технологічного процесу копчення риби представляє собою сукупність функціональних схем, рівнянь, логічних операторів, номограм, таблиць і т. п., за допомогою яких характеристики стану системи визначають в залежності від параметрів процесу, вхідних сигналів і часу. На рис. 17.5 наведена модель технологічного процесу копчення рибних продуктів, а на рис. 17.6 наведено розроблений роботизований комплекс виробництва копченої риби.



**Рисунок 17.5.– Модель технологічного процесу копчення рибних продуктів**

Вхідними параметрами  $\bar{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$  моделі дискретної виробничої системи є риба, додаткові інгредієнти, вода, пара, електрика, тощо для виробництва смарт-продуктів харчування. Вихід цієї системи  $\bar{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$  представляють показники смарт-продукту харчування і відходи виробництва. Виробничий процес управляється за допомогою АСУТП, MES-, ERP- й SCADA-системами, оперативними і стратегічними планами  $\bar{U} = (U_1, U_2, \dots, U_n)$ , складеними на основі технологічних показників. Для реалізації цих показників потрібні ресурси ( $R$ ) у вигляді персоналу і обладнання та технічних засобів (робототехнологічний комплекс з виробництва рибних продуктів). Як відомо

[3,13], технологічні процеси харчових виробництв є достатньо складними багатопараметричними об'єктами з множиною нелінійних зв'язків. Стандартні засоби автоматизації уже не забезпечують належного рівня надійності і швидкодії. У сучасних умовах глобальної конкуренції на ринках країн ЄС необхідно використовувати нові, прогресивні способи контролю і керування якісними показниками копченої рибно́ї продукції.

Найбільш перспективними є системи контролю вихідних параметрів  $\{\bar{Y}\}$  на базі використання штучних нейронних систем [1, 2,8, 20, 27] та інтелектуальних технологій в системах керування робототехнологічними комплексами (робототехнічні маніпулятори завантаження сировини з визначенням оптимальної траєкторії взаємодії імпульсного ультразвукового інтенсифікатора з продуктом, управління часом взаємодії). Використання інтелектуальних технологій у процесах виробництва копченої риби за критерієм мінімізації енергозатрат (газу, електрики, пари) і мінімізації викидів  $\{\bar{Y}_3, \bar{Y}_4\}$ , особливо підтримання концентрації CO<sub>2</sub> в заданих межах, що вимагає від науковців використання штучних нейронних мереж (ШНМ) для прогнозування якості вихідних показників [1].

Отже, для покращення якості керування складним технологічним процесом копчення риби (рис. 17.6) будемо використовувати: цифрову платформу «Їжа» з програмним забезпеченням (ПЗ) автоматизованого управління верхнім рівнем виробничої системи, MES-системи операційного виробництва, ERP-системи управління бізнес-процесами і стратегічного планування, інтелектуальні системи підтримки прийняття операційних рішень (ІСППОР), АСУТП з нейромережевими регуляторами (НМР), а також автоматизовані робочі місця операторів [1,11,13].

Із теорії автоматичного управління відомо, що сформувавши ідеальне управління  $\bar{U}$  можливо, знаючи миттєве значення якобіана – матриці приватних похідних вектора стану копильного апарату (копильної камери) щодо змінних керування впливів  $\{\bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{U}_3\}$ . Метою цієї операції є переведення об'єкта управління (копильного апарату) із поточного стану в бажаний. Одним із найбільш ефективних і зручних щодо реалізації на сучасних мікропроцесорах методів ідентифікації невідомих параметрів багатомірних систем є алгоритм Качмажа [1,2,65]. Він дозволяє інтерактивно визначити матрицю  $A$  невідомих параметрів лінійної дискретної системи виду:

$$X_K = A^m \bar{U}_K, \quad (17.7)$$

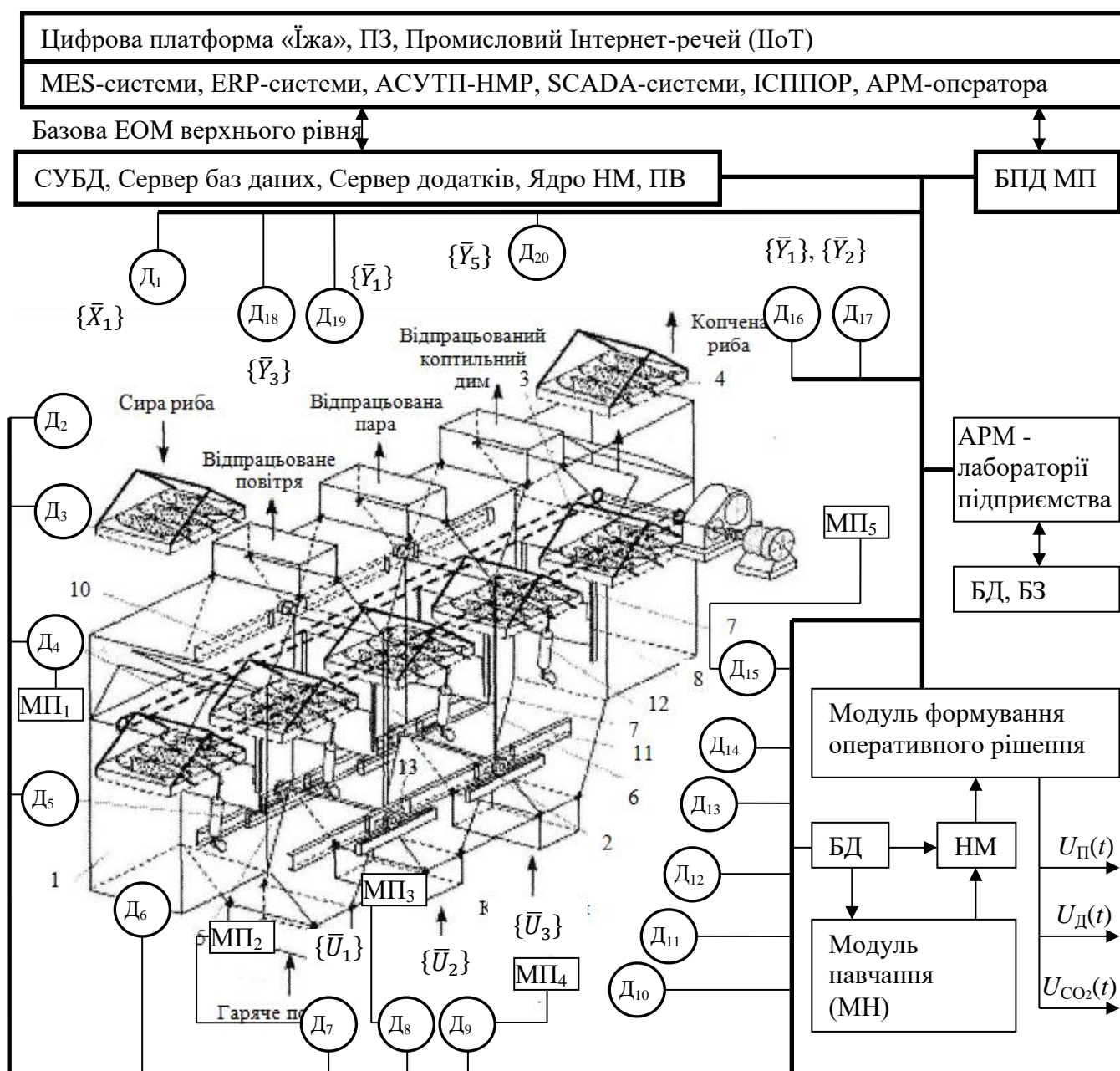
де  $X_K$  – параметри вхідних чинників стану сировини й об'єкту керування;  
 $\bar{U}_K$  – вектор управлінських впливів.

Нейромережева ідентифікація є альтернативою традиційним методам і найбільш підходить для оцінки якобіана при синтезі нелінійних об'єктів – виробництва копченої риби.

Для побудови адекватної динамічної моделі процесу копчення риби необхідно побудувати систему інформаційного забезпечення з датчиками  $D_1$ - $D_{20}$  технологічних змінних, а для оцінки якісних показників копченої риби  $\{\bar{Y}\}$

необхідно розробити гібридну модель нейромережевого прогнозатора і регулятора НМР, якісних показників готового продукту, для яких раніш невідомі вхідні параметри і неможливо побудувати математичну модель, що б враховувала множинні нелінійні зв'язки [8,11,20,27].

У той же час в умовах мінімізації викидів вуглекислого газу  $\text{CO}_2$  і керування складним процесом дифузії ультразвукових коливань в риби продукти в середовищі коптильного диму структура розробленого нейромережевого регулятора (НМР) повинна включати: базу даних (БД), модуль навчання (МН), нейромереж (НМ) і модуль формування оперативного рішення. Від системи інформаційного забезпечення з датчиків  $D_1$ - $D_{20}$  (виконаної на базі SCADA-системи) інформація надходить в базу даних. ЕОМ верхнього рівня передає параметри  $\{\bar{X}\}$  в модуль навчання МН, де відбувається навчання нейромережі (НМ).



**Рисунок 17.6 – Робототехнологічний комплекс копчення риби з автоматизованими системами керування технологічним процесом:**

1 – робототехнологічний комплекс; 2 – робоча камера; 3 – транспортер з ультразвуковою системою імпульсного впливу на продукт; 4 – решітчасті піддони з системою контролю параметрів рибної продукції ( $D_2$ ); 5 – секція підсушування з системою контролю температурних параметрів; 6 – секція проварювання з системою автоматизованого контролю і регулювання часу проварювання; 7 – секція коптіння з системою автоматизованого контролю та керування процесу коптіння за параметрами температури коптільного диму; 8 – робот камери розвантажування рибопродукту; 9 – вимірювання ваги; 10, 11 – направляючі; 12 – виконуючі механізми з АД-ТПЧ; 13 – трубний вал із системою контролю швидкості руху рибопродуктів у системі РТК ( $D_5$ );  $D_1$ - $D_{20}$  – датчики параметрів технологічного процесу копчення риби; МФОР – модуль формування оперативних рішень з блоками БД – база даних, НМ – нейромережа, МН – модуль навчання; МП<sub>1</sub>-МП<sub>5</sub> – мікропроцесори керування технологічними агрегатами і апаратами РТК; БПД – блок передачі даних в мікропроцесори (МП<sub>1</sub>-МП<sub>5</sub>); АРМ – автоматизовані робочі місця оператора та лабораторії підприємства

Разом з вхідними параметрами БД ЕОМ передає в нейромережу також попередні значення параметрів якості копченої риби, поточні значення  $CO_2$  та значення керованих впливів  $\{\bar{U}\}$ .

Після цього навчена нейронна мережа за рахунок модуля формування рішення видає рекомендації оператору АРМ та безпосередньо впливає на виконавчі механізми РТК копчення риби, щодо мінімізації поточних параметрів енергоспоживання  $E_{\text{пот}} \in E_{\text{min}}$  та виділення вуглекислого газу  $CO_{2 \text{ пот}} \in CO_{2 \text{ min}}$ . З цією метою локальні системи керування технологічними процесами завантаження, підсушування, проварювання, копчення, зважування, оцінки геометричних розмірів рибної сировини, виконані на базі мікропроцесорних контролерів SCADA-систем (МП<sub>1</sub>-МП<sub>5</sub>).

На рис. 17.7 наведено структуру нейромережі, яку використано для прогнозування оператору (АРМ) наступних параметрів:  $T_{\text{к.д}}(t)$  – температури коптільного диму в робочій камері копчення;  $Q_{\text{к}}(t)$  – продуктивність секції копчення;  $\tau_{\text{к}}(t)$  – тривалість (час, хв.) процесу копчення. Прогнозування цих важливих параметрів оператору виконується в інформаційній автоматичній системі вимірювання параметрів:  $X_{11}$ - $X_{1n}$  – параметрів  $CO_2$ ;  $X_{22}$ - $X_{2n}$  – контроль процесу копчення;  $X_{33}$ - $X_{3n}$  – коптільного диму;  $X_{44}$ - $X_{4n}$  – управлінські впливи (швидкість коптільного диму);  $X_{55}$ - $X_{5n}$  – якість сировини (рибного продукту) та її геометричні параметри.

Вхідні параметри:

Автоматичний контроль  $CO_2$  за допомогою датчика концентрації CO 112 KIMO INSTRUMENTS, параметри  $\{\bar{X}_{11} \dots \bar{X}_{1n}\}$ ;

Автоматичний контроль процесу копчення, ємнісний датчик температури й відносної вологості диму A2G-70, параметри  $\{\bar{X}_{22} \dots \bar{X}_{2n}\}$ ;

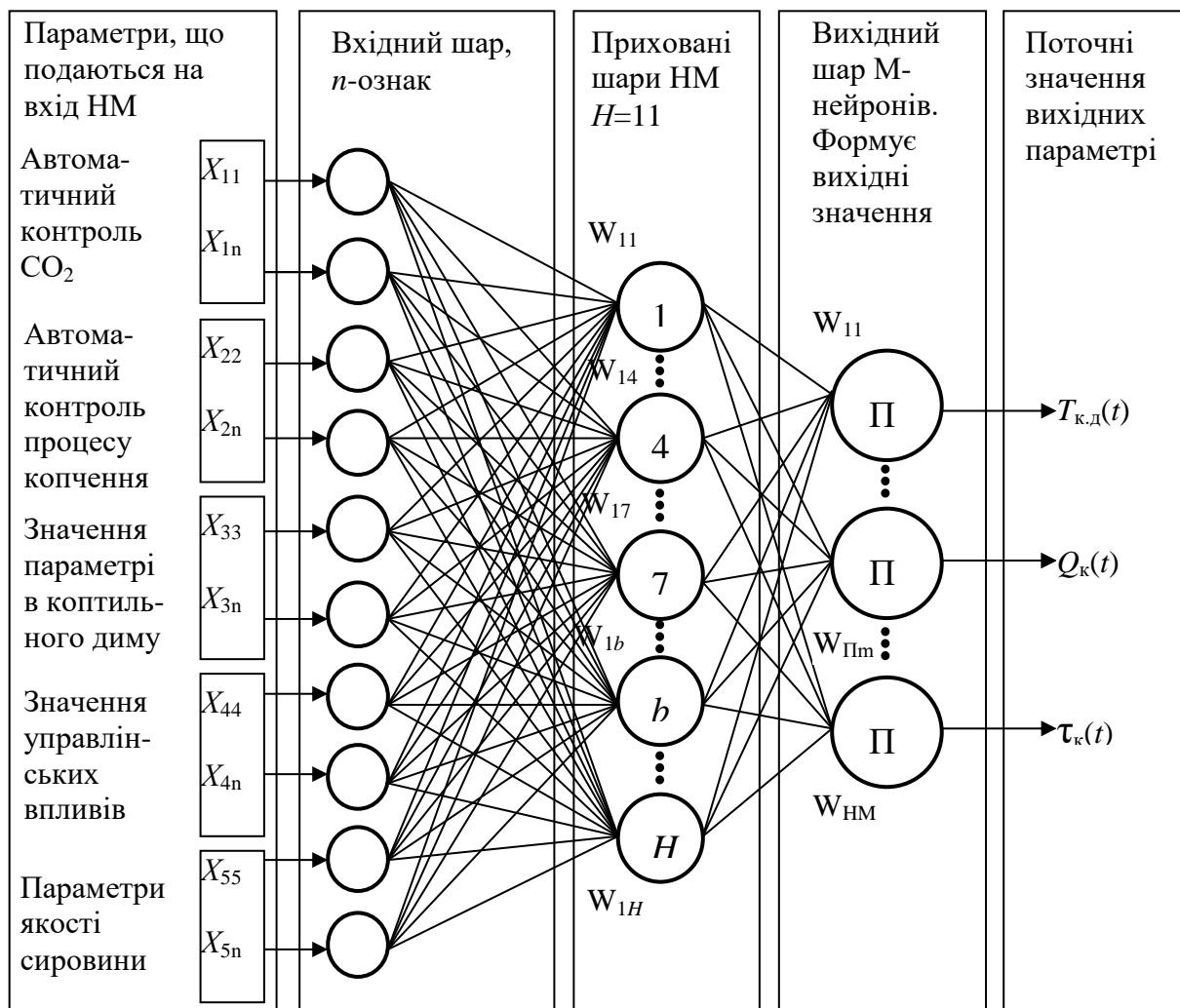
Значення параметрів коптільного диму, параметри  $\{\bar{X}_{33} \dots \bar{X}_{3n}\}$ ;

Значення управлінських впливів, параметри  $\{\bar{X}_{44} \dots \bar{X}_{4n}\}$ ;

Параметри якості сировини, параметри  $\{\bar{X}_{55} \dots \bar{X}_{5n}\}$ .

Навчання мережі проводиться вчителем-експертом, після чого навчена

мережа перевіряється на адекватність та якість функціонування. У процесі оцінки працездатності нейромережевої моделі експертним шляхом встановлено, що помилка навчання складає близько двох відсотків



**Рисунок 17.7.** – Структура нейронної мережі для прогнозування параметрів копчення:  $T_{к.д}(t)$  – оптимальна температура коптильного диму в робочій камері копчення;  $Q_{к}(t)$  – продуктивність секції копчення;  $\tau_{к}(t)$  – оптимальний час копчення

Це значення дозволяє оператору з високим рівнем точності приймати оперативні рішення щодо автоматизованого управління процесом копчення риби з оптимальними параметрами:

- 1) коптильного диму;
- 2) швидкості коптильного диму;
- 3) вологості коптильного диму;
- 4) температури пари на стадії проварювання;
- 5) геометрії сировинного продукту (відношення довжини  $L$  до товщини  $B$ );
- 6) довжини ультразвукової хвилі;



- 7) часу імпульсного ультразвукового оброблення рибної сировини;
- 8) тривалості інтервалу ультразвукового сигналу оброблення.

Межові припустимі помилки навчання мережі були вибрані на основі експертних оцінок технологів (досвідчених операторів), які відповідають за якість продукції – копченої риби.

Таким чином, використання методу, заснованого на роботі НМ-Р в АСУТП і ІСППОР дозволяє АРМ оператора працювати з набором вхідних параметрів будь-якого рівня декомпозиції та, головне, враховувати вплив кожного параметру на продуктивність  $Q_k(t)$  процесу копчення. Вибір оптимальних управлінських параметрів,  $U_{п}(t)$  – температури пару,  $U_{д}(t)$  – температури копильного диму,  $\bar{U}_{CO_2}(t)$  – вмісту  $CO_2$ , дозволяє оператору мінімізувати енергетичні параметри  $E_{копч}$  та стабілізувати якість продукції. Після навчання НМ-Р за допомогою ПЗ верхнього рівня (MES-системи оперативного планування і керування) виконується автоматичний розрахунок основних величин параметрів  $\bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{U}_3 \dots$  для кожного різновиду рибної сировини та прогнозування параметрів  $\{\bar{Y}_1, \bar{Y}_2, \bar{Y}_3 \dots\}$ .

Програмне забезпечення (ПЗ) функціонує в локальній мережі, яка включає персональні комп'ютери (автоматизоване робоче місце – АРМ) і два сервери (сервер бази даних й сервер додатків). Програмне забезпечення включає в себе такі компоненти:

1. СУБД – забезпечує збереження усіх баз даних, встановлюється на сервер баз даних. В якості СУБД використовується Oracle Server. Сервер баз даних є системоутворюючим елементом системи і забезпечує функціонування бази даних системи і доступу до неї сервера додатків і робочих станцій.

Сервер додатків реалізує основну функцію системи – оброблення даних контролюємих параметрів ( $D_1$ - $D_{20}$ ) технологічного процесу копчення риби і прогнозування вихідних показників  $\{\bar{Y}_1, \bar{Y}_2, \bar{Y}_3, \bar{Y}_4\}$ .

2. Програма оцінки якості продукції є обчислювальним ядром системи. Встановлюється на комп'ютер, який виконує функції сервера додатків. Програма має два режими: «Контроль» і «Навчання». Основний режим функціонування «Контроль» виконується постійно. Переведення в режим «Навчання» НМ модуля формування оперативних рішень виконується на початковому етапі роботи робототехнологічного комплексу копчення риби. З метою формування розпізнавальних правил нечіткого виведення для:

- а) досягнення задовільних результатів МН прогнозу якості чинників  $\{\bar{Y}_1\}$ ,  $\{\bar{Y}_2\}$ ,  $\{\bar{Y}_3\}$ ,  $\{\bar{Y}_4\}$ ,  $\{\bar{Y}_5\}$ ;

- б) для відпрацювання оптимальних  $\{\bar{U}_{п}(t)\}$ ,  $\{\bar{U}_{д}(t)\}$ ,  $\{\bar{U}_{CO_2}(t)\}$  в умовах переходу на новий вид сировини;

3. Програма візуалізації (ПВ) запускається із комп'ютера АРМ в потрібний час користувачем АРМ. Програма функціонує за технологією «клієнт-сервер» і підключена до серверу баз даних Oracle шляхом ПЗ Oracle Client і відповідного налаштування ODBC-джерел.

Сервер баз даних, сервер додатків, АРМ функціонують на платформі IBM System×3550 з операційною системою Windows 2000/2003. Режим роботи

програмного забезпечення:

- сервер баз даних і сервер додатків повинні функціонувати в режимі 24×7;
- автоматизовані робочі місця операторів функціонують в режимах, які відповідають робочому часу операторів.

Програмні модулі системи розроблено в середовищі Microsoft Visual C++ 6 SP 6 та Microsoft Visual C++ 2003 NET.

З метою створення програмного інтерфейсу доступу до БД необхідно застосувати ODBC-з'єднання (Open Database Connectivity), вказавши необхідні параметри доступу – назву мережевого з'єднання з сервером СУБД Oracle, назву бази даних, ім'я користувача і пароль АРМ-оператора.

У табл. 17.2 наведено результати імітаційного моделювання режимів роботи інтелектуального комплексу робототехнічного управління копченням п'яти сортів риби з експертною оцінкою її якості. Оцінювання якості копченої риби за органолептичними показниками проведені за методикою, розробленою спеціалістами ХДУХТ

**Таблиця 17.2.**

**Результати роботи інтелектуального комплексу  
копчення риби в робототехнічній системі виробництва рибопродуктів**

Номер партії та вид риби	Фактори для навчання мережі НМ-Р							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Значення факторів	Температура копильного диму: 348...358 К	Швидкість руху копильного диму: 0,1...0,5 м/с	Вологість копильного диму: 40...60%	Температура пари на стадії проварювання: 374...382 К	Геометрія сировинного рибного продукту (відношення довжини L до товщини B): 3,0...5,0	Довжина ультразвукової хвилі: 200, 250, 300, 350, 400 нм	імпульсного ультразвукового оброблення: 4, 6, 8, 10, 12 с	Тривалість інтервалу між ультразвуковою обробкою: 3, 5, 10, 15 хв
відмінна якість копченої риби								
1 (скумбрія)	350	0,25	45	375	3,0	250	10	5
2 (горбуша)	352	0,26	48	380	3,9	300	12	10

Продовження таблиці 17.2.

Номер партії та вид риби	Фактори для навчання мережі НМ-Р							
	1	2	3	4	5	6	7	8
3 (сом)	351	0,31	50	378	4,2	350	10	15
4 (минтай)	353	0,35	55	380	3,1	350	12	15
5 (лящ)	354	0,48	52	379	4,25	200	8	12
добра якість копченої риби								
1 (скумбрія)	350	0,35	50	380	3,1	350	12	15
2 (горбуша)	350	0,38	50	385	3,5	350	12	
3 (сом)	355	0,40	55	382	3,5	350	12	15
4 (минтай)	358	0,42	56	380	4,0	350	12	15
5 (лящ)	355	0,45	55	382	4,5	355	12	15
задовільна якість копченої риби								
1 (скумбрія)	356	0,47	58	380	4,5	400	8	10
2 (горбуша)	358	0,47	58	380	4,2	400	8	10
3 (сом)	358	0,48	58	380	4,6	400	8	10
4 (минтай)	356	0,49	58	380	4,8	400	8	5
5 (лящ)	350	0,50	58	380	4,7	400	6	5

Аналіз результатів моделювання для п'яти видів риби дозволяє зробити висновок про достатню ступінь точності роботи інтелектуального комплексу з імпульсним ультразвуковим інтенсифікатором процесів дифузії компонентів копильного диму та прогнозування восьми чинників, які визначають роботу комплексу. Результати роботи інтелектуального робототехнологічного комплексу можуть бути використані в режимі підтримки прийняття оперативних рішень (ІППОР) при управлінні процесом копчення різних сортів риби з мінімізацією впливу CO<sub>2</sub> на навколишнє середовище та оптимальними параметрами енергозатрат (пари, газу, електрики) і параметрами кулінарної готовності рибної продукції.

**Таким чином,** розроблено інтелектуальний робототехнологічний комплекс виробництва рибопродуктів з нейромережевим прогнозатором температури коптильного диму, швидкості коптильного диму, параметрів CO<sub>2</sub>, продуктивності технологічної лінії копчення. Результати лабораторних досліджень показали, що інтелектуальний робототехнологічний комплекс з імпульсним ультразвуковим інтенсифікатором процесу дифузії забезпечує АРМ оператора, за допомогою нейромережевого регулятора і прогнозатора робочих характеристик обладнання технологічної лінії копчення рибопродуктів, оптимальними параметрами регулювання параметрів установки, підвищує якість керування нею та є адаптивним по відношенню до умов виконання технологічного процесу копчення різновидів рибних продуктів за рахунок модуля формування оперативних рішень, інтелектуальної системи підтримки прийняття оперативних рішень, цифрової платформи «Іжа», промислового Інтернету-речей, MES, ERP, SCADA систем.

Отже, рибна продукція одержана з використанням імпульсного ультразвукового оброблення має кращі органолептичні показники: час до досягнення кулінарної готовності скорочується на 20%, продукція характеризується високою харчовою цінністю, добрими споживчими властивостями, високим вмістом білків, жиру та мінеральних речовин.

### ***Контрольні запитання***

- 1. Дайте визначення фізичним характеристикам середовища копчення(соління) рибних продуктів.*
- 2. З якими параметрами пов'язана амплітуда ультразвукової установки в середовищі риба- вода; риба- дим*
- 3. Як впливає на роботу робототехнологічного комплексу копчення риби відхилення ваги та розмірів від заданих параметрів.*
- 4. Як працює система оцінки кількісних параметрів CO<sub>2</sub>*
- 5. В чому полягає універсальність алгоритмів систем робототехніки в автоматизованій багатоканальній системі виробництва копченої риби.*
- 6. Для чого використовують нечіткі алгоритми керування процесом копчення риби.*
- 7. Наведіть показники якості РТК.*
- 8. Назвіть критерії експертної оцінки якості копченої риби за допомогою системи з нечітким керуванням.*

## **Тема 18. Автоматизована система нечіткого керування виробництвом згущеного молока**

### **18.1. Загальні проблеми автоматизації виробництва молочної продукції.**

На якість молочної продукції істотно впливає вологість вихідної сировини - молока. Навіть незначне зниження цього показника помітно нейтралізує негативний вплив навколишнього середовища і життєдіяльності мікроорганізмів на технологічні процеси в молочно-консервній промисловості і, як наслідок - підвищує терміни зберігання готової продукції.

Проте видалення вологи з молочних продуктів пов'язане з великими енерговитратами. Наприклад, в технологічному процесі випарювання молока при низькому тиску, який в молочній промисловості вважається найбільш поширеним і складним, кількість витраченої енергії нелінійно зростає, приблизно, подвоюючись на кожні (5-10%) випарюваної вологи.

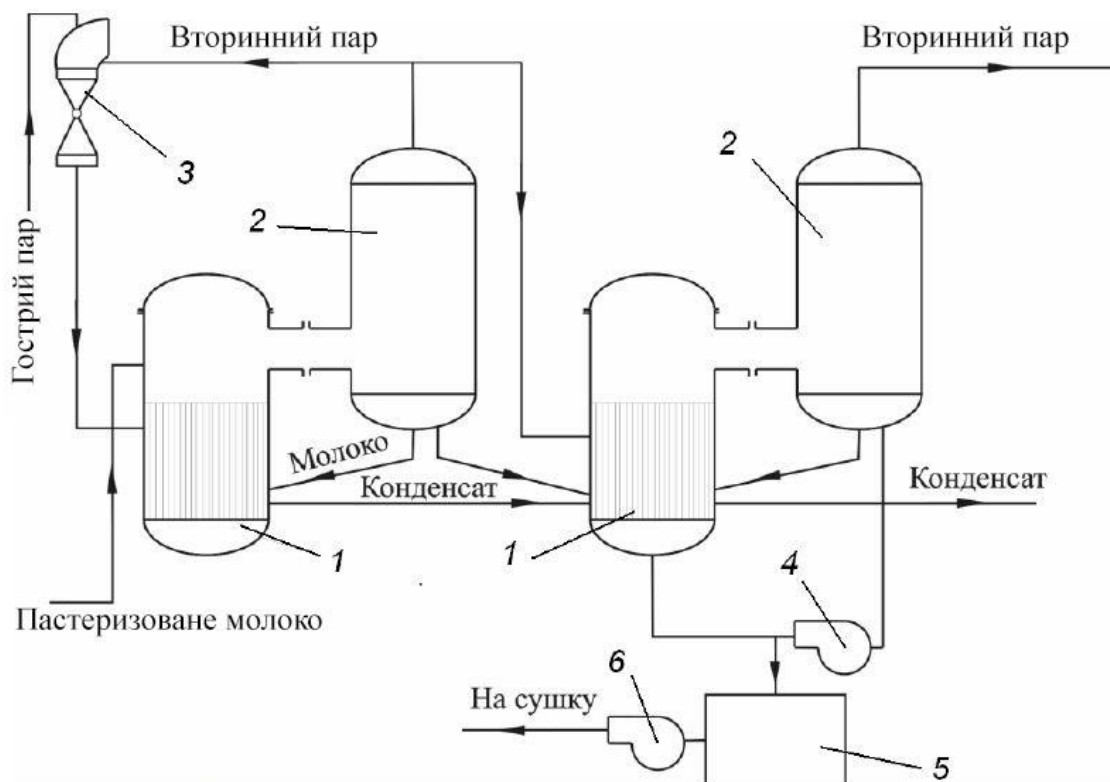
У багатовіковій боротьбі за економію енергії при виробництві молочних продуктів високої якості, найбільш ефективним, але разом з тим і трудомістким виявилось ручне управління, коли людина, що добре володіє процесом, безпосередньо введена в контур регулювання значеннями технологічних параметрів. Спроби використовувати для цих цілей ПІ і ПІД-регулятори через нестабільність параметрів сировини, нелінійності, багатовимірності і невизначеності біохімічних явищ, що протікають в технологічних апаратах з переробки молока, не забезпечують необхідної якості регулювання. Крім того, ряд технологічних процесів в молочно-консервній промисловості досі не має точних математичних моделей, що ускладнює використання найбільш рентабельних і широко поширених класичних систем регулювання. Така ж тенденція проявляється і по відношенню до технологій теплової обробки молока, які, як правило, мають нелінійні математичні моделі високого порядку. Але саме вони найчастіше є найбільш енерговитратними і визначають рівень розвитку галузі в цілому і тому найбільш актуальні для автоматизації. Цілком очевидно, що в подібних випадках доцільно використовувати нечітке регулювання.

Огляд засобів і способів керування технологічними процесами в харчовій промисловості показує, що нечіткі алгоритми застосовуються, в основному, для підтримки на певному рівні значення технологічних параметрів і практично не використовуються для економії енерговитрат. Хоча в інших галузях (енергетика, машинобудування, хімічна промисловість, підприємства будматеріалів та ін.) нечітке регулювання для вирішення подібних завдань застосовується з 70-х років 20 століття. Це підтверджується роботами таких авторів як Л. А. Заде, Е. А. Мамдані, Цукамото, С. Осовського, В. В. Круглова та ін.[8,38] Незважаючи на велику кількість публікацій про нечіткі регулятори, специфіка нечіткого управління технологічними процесами в молочно-консервній галузі, і особливо в частині енергозбереження, не знайшла належного висвітлення.

Таким чином, завдання оперативного управління зниженням витрат енергії на базі нечітких алгоритмів, що враховує особливості технологічних процесів і виробництва в молочно-консервній промисловості є актуальною науковою задачею, рішення якої сприяє зниженню собівартості молочних продуктів без залучення додаткових великомасштабних інвестицій.

**Метою цієї теми підручника** є зниження витрат енергії технологічного процесу випарювання молочних продуктів за рахунок розробки системи автоматизованого керування на основі нечітких алгоритмів з автоматичною модифікацією системи продукційних правил.[8,38] Перейдемо до вивчення більш детально параметрів технологічного процесу як об'єкту керування.

Для систем автоматизованого регулювання витрати пару існує необхідність формування, в режимі реального часу, відповідних засобів автоматики, що забезпечують не лише зниження витрат енергії, а головне забезпечать виробництво смарт - продукції харчування.



**Рисунок 18.1. - Схема двокорпусної вакуум-випарної установки циркуляційного типу безперервної дії:**

1 - калоризатор; 2 - паровідділювач; 3 - термокомпресор; 4 – продуктивний циркуляційний насос; 5 - проміжний бак з мішалкою; 6 - насос для подачі згущеного молока на сушку

Як об'єкт керування був обраний процес випарювання згущеного молока в калоризаторі, оскільки в харчовій промисловості він є одним з основних споживачів енергії. Схема двокорпусної вакуум-випарної установки циркуляційного типу безперервної дії для згущення цільного і знежиреного молока, а також для випарювання сироватки представлена на рис.18.1.

Аналіз технологічного процесу показує, що підтримувати постійну температуру молока в корпусі вакуум-випарної установки в режимі реального часу є важливим для реалізації завданням. Це пов'язано з тим, що молоко є «живою» сировиною, хімічний склад якої змінюється від сезону до сезону.

У процесі отримання, зберігання, транспортування і переробки молоко також може змінювати свої властивості під впливом цілої низки чинників: температури навколишнього середовища, життєдіяльності організмів та ін. Врахувати всі ці нечіткі фактори при виробництві молочних продуктів в умовах невизначеності не можливо. Тому що в даний час в молочно-консервній промисловості застосовуються САР з типовими ПІ, ПІД-регуляторами. Останні не забезпечують належної якості керування процесом випарювання молочних продуктів за критерієм енергоефективності.. Слід зазначити, що застосовуються вони в основному для підтримки на заданому рівні таких параметрів як температура, тиск і витрати сировини.

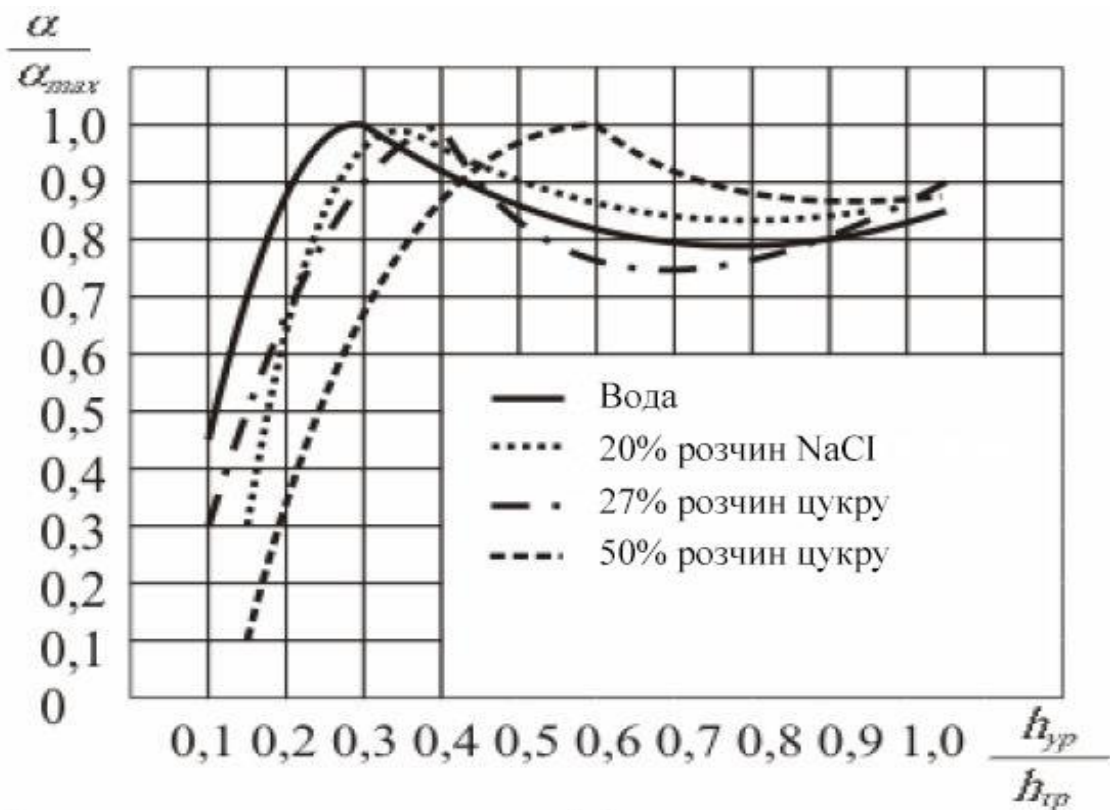
У процесі аналізу існуючих систем керування процесами випарювання молочних продуктів встановлено, що найкращим способом зниження витрат енергії є пряме регулювання витрати пару, при якому, до того ж, досягається стабільно висока продуктивність установки і необхідна якість готового продукту. Завданням систем автоматизованого регулювання, в цьому випадку, є формування відповідних засобів, що забезпечують зменшення витрати пару без втрати інтенсивності протікання процесу і зниження якості кінцевого продукту.

Проведений огляд методів реалізації нечітких регуляторів в молочно-консервній промисловості показує, що, в порівнянні з типовими ПІД-регуляторами, вони дозволяють забезпечити більш високу якість управління, відрізняються простим алгоритмом синтезу і можуть успішно використовуватися в процесах теплової обробки молочних продуктів.

Аналіз засобів керування показав, що для досягнення найкращого результату при синтезі нечіткої системи управління в молочно-консервній промисловості доцільно використовувати нечіткий регулятор з автоматичною модифікацією системи продукційних правил, що моделює дії людини-оператора (експерта)[2,8].

Спочатку необхідно розробити нечіткий алгоритм і на його основі нечіткий регулятор з лінгвістичним зворотним зв'язком, система продукційних правил якого модифікується в режимі реального часу.

Для цього дослідним шляхом визначимо умови, за яких калоризатор працює найбільш інтенсивно. Експертами встановлено, що рівень, до якого в апараті з вертикальними трубками рідина, що не кипить, заповнює трубки, має великий вплив на інтенсивність процесу, яка характеризується величиною коефіцієнта теплопередачі. На основі експертних досліджень можливо побудувати графіки залежності коефіцієнта теплопередачі від ступеня заповнення вакуум-апарату.



**Рисунок 18.2.- Графік залежності коефіцієнта теплопередачі від ступеня заповнення вакуум-апарату**

*$\alpha$  - коефіцієнт теплопередачі,  $\alpha_{max}$  - максимальний коефіцієнт теплопередачі,  $h_{ур}$  - висота заповнення трубки,  $h_{тр}$  - висота трубки.*

На рисунку 18.2 приведені графіки, що ілюструють інтенсивність теплопередачі в залежності від наповнення і концентрації рідини в вакуум-апараті, з яких випливає, що найбільший коефіцієнт тепловіддачі досягається при заповненні від 0,3 до 0,6 висоти  $H$  вертикальних трубок. Численні експериментальні дослідження підтверджують, що калоризатори працюють найефективніше при наповненні трубок приблизно від  $1/3$  до  $1/2 H$ . При цьому оптимальне заповнення трубок  $h_0 = H/3$ .

Величина коефіцієнта теплопередачі в вакуум-апараті грає вирішальну роль для досягнення високої інтенсивності процесу випарювання і зниження витрат енергії. Оскільки межа розділу рідкої і газоподібної фази продукту є нечіткою, то технічно неможливо безпосередньо виміряти або регулювати висоту заповнення трубок в процесі роботи вакуум-випарювального апарату. Також неможливо, в режимі реального часу, вимірювати коефіцієнт теплопередачі апарату. Тому домогтися високого коефіцієнта теплопередачі можливо за рахунок оперативного регулювання відношення витрат пару до витрат сировини, так як саме це відношення впливає на ступінь заповнення трубок апарату. За умови підтримки постійної витрати сировини, головним параметром залишається витрати пару. Таким чином, єдиним способом досягнення максимуму коефіцієнта теплопередачі  $\alpha$ , крім вдосконалення



конструкції апарату, є пряме регулювання витрат теплоносія  $F_{пар}$ .

У процесі виробництва молочних продуктів, поряд зі зниженням енерговитрат, необхідний автоматичний контроль за якістю готової продукції. Основним параметром якості при випарюванні є вологість  $\lambda$ . Для зв'язку витрачання енергії з вологістю введений коефіцієнт ефективності енерговитрат  $K_{ен}$ :

$$K_{ен} = \frac{F_{пар}}{(\lambda_1 - \lambda)} \quad (18.1)$$

де  $\lambda$  - вологість готового продукту,  $\lambda_1$  - вологість сировини,  $F_{пар}$  - витрата пару.

Вологість готового продукту визначається за формулою:

$$\lambda = \frac{\rho_c [1 + \beta_c (T_0 - T)] F_{сировини}}{\rho_n [1 + \beta_n (T_0 - T)] F_{прод}} \lambda_1 \quad (18.2)$$

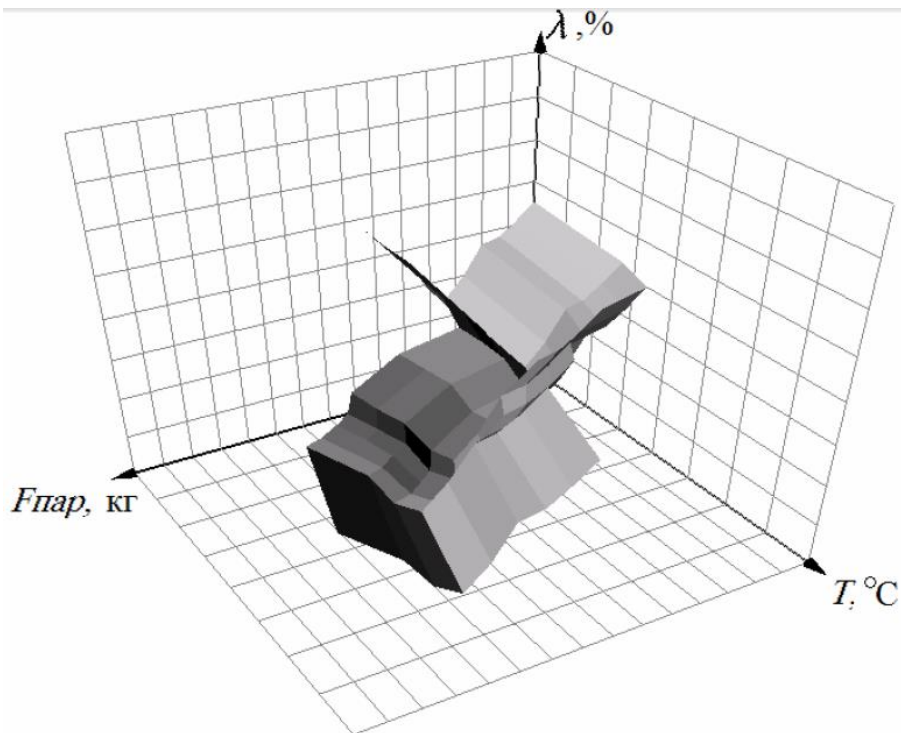
де  $\rho_c$  і  $\rho_n$  - відповідно щільність сировини і готової продукції при температурі  $T_0$ ;  $\beta_c$  і  $\beta_n$  - температурний коефіцієнт об'ємного розширення сировини і готової продукції.

Вираз (18.1) з урахуванням (18.2) набуває вигляду:

$$K_{ен} = \frac{F_{пар} \rho_n [1 + \beta_n (T_0 - T)] F_{прод}}{\lambda_1 (\rho_n [1 + \beta_n (T_0 - T)] F_{прод} - \rho_c [1 + \beta_c (T_0 - T)] F_{сировини}} \quad (18.3)$$

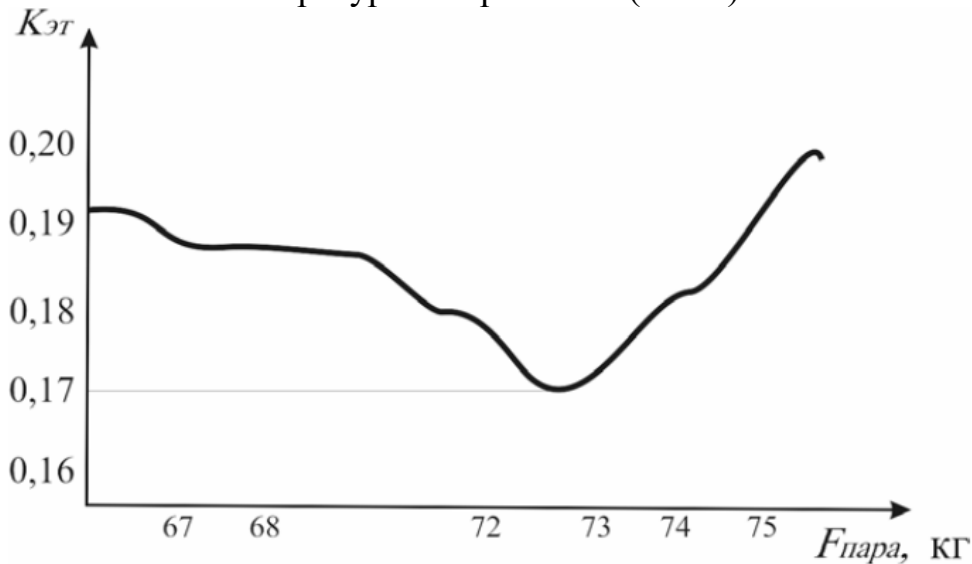
Коефіцієнт ефективності енерговитрат визначає кількість енергії, витраченої на випарювання одиниці вологості. Чим нижче  $K_{ен}$ , тим вище ефективність використання енергії. Відповідно для зниження витрат енергії необхідно прагнути до зменшення даного коефіцієнта.

Через складність фізичних процесів в калоризаторі до сих пір не вдається розробити раціональну математичну модель для мінімізації витрат енергії при випарюванні молочних продуктів. Для вирішення цієї вельми важливої для молочно-консервної промисловості завдання експертами були проведені експериментальні дослідження, на основі яких побудована функція залежності температури випарювання від витрат пару, що гріє і витрат продукту, яка представлена на рис.18.3.



**Рисунок 18.3.** ( $F_{пар}$ ) в калоризаторі

На підставі цих досліджень встановлено залежність коефіцієнта ефективності енерговитрат  $K_{ен}$  від витрати пару при різних значеннях температури випарювання. На рис.18.4 представлена залежність  $K_{ен}$  від витрати пари при оптимальній температурі випарювання (50 °C).

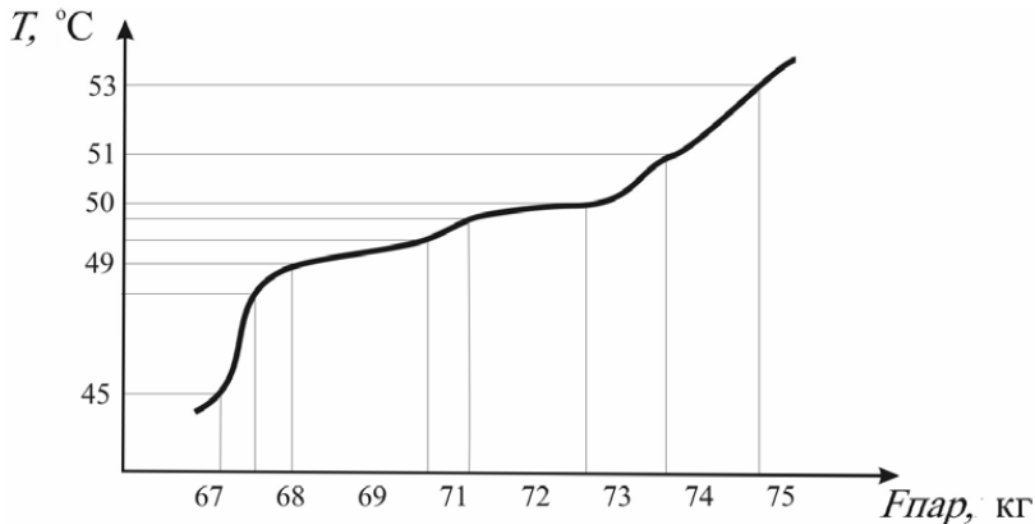


**Рисунок 18.4.** - Залежність  $K_{ен}$  від витрати пари при  $T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$

З нього випливає, що існує режим роботи вакуум-випарювального апарату, при якому коефіцієнт ефективності енерговитрат, а, значить, і витрати енергії мають мінімальне значення. Для управління вакуум-випарювальним апаратом з мінімальним значенням  $K_{ен}$  запропоновано ввести три лінгвістичні змінні: «Температура», «Витрати пару» і «Вологість». Лінгвістичною змінною будемо називати змінну, значеннями якої можуть бути слова(наведені вище)

або словосполучення деякої природної або штучної мови.

З цією метою крива на рисунку 18.5 розбита на 9 зон, межі яких визначаються точками перетину залежності температури  $T$  від витрати пари в калоризаторі.



**Рисунок 18.5.- Залежність "Температура-витрати пари" в калоризаторі при  $K_{en} = 0,17$**

В наших проектних рішеннях запропонований метод автоматичної модифікації продукційних правил, заснований на алгоритмі виділення зон в режимі реального часу за графіком на рис.18.5.і наступних змінах відповідно до кількості виділених зон функцій належності термів лінгвістичних змінних. Терм-множиною будемо називати множину всіх можливих значень лінгвістичної змінної. У теорії нечітких множин терм формалізується нечіткою множиною за допомогою функції належності[8].

З цією метою в процесі роботи випарної установки керуюча програма виділяє точки перегину функції зміни температури в залежності від зміни витрати пари, які в подальшому стають межами нових зон.

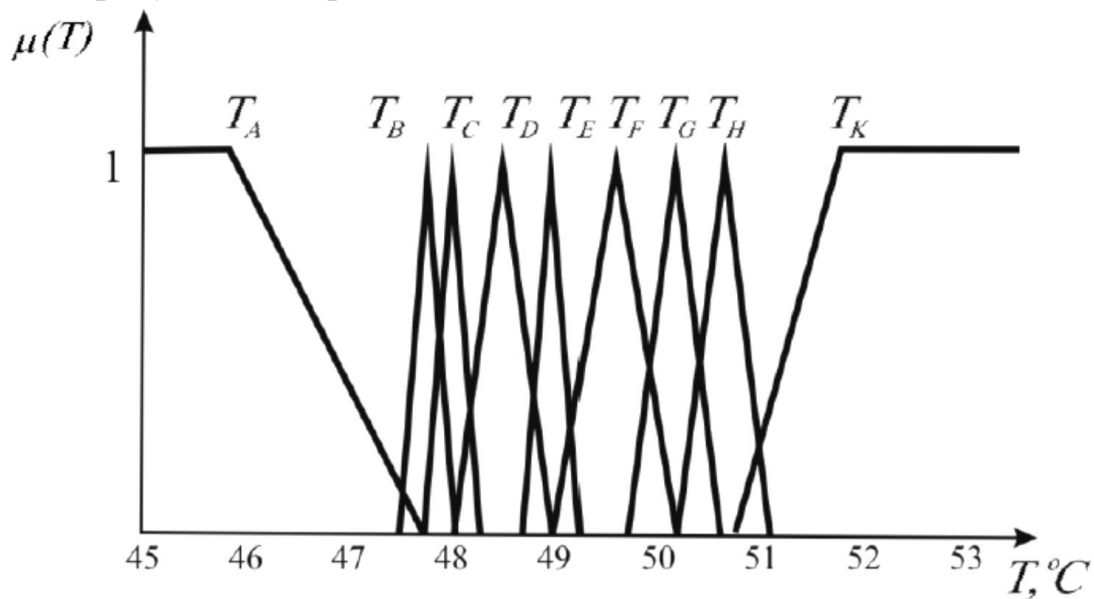
Потім в кожній зоні визначаються відповідні терми лінгвістичних змінних «Температура», «Витрати пари» і «Вологість». Будуються функції приналежності згаданих лінгвістичних змінних. Так як залежність "температура-витрати пари" носить нелінійний характер, то область значень кожної змінної розбивається на наступні нерівні інтервали:

Крива на рис.18.5 розбита на зони, в межах яких вона має постійний кут нахилу до осі «Витрати пари». Центр кожної зони по осі температур наведено на рисунку 18.6. Аналогічним чином побудовані функції належності термів для лінгвістичних змінних «Витрати пари» і «Вологість».

$$\mu(t) = \begin{cases} 1 - |t - 46| / 2 & \text{для } t \in [45; 47,7] ; \\ 1 - |t - 47,75| / 0,25 & \text{для } t \in [47,5; 48] ; \\ 1 - |t - 48| / 0,25 & \text{для } t \in [47,75; 48,25] ; \\ 1 - |t - 48,5| / 0,5 & \text{для } t \in [48; 49] ; \\ 1 - |t - 49| / 0,25 & \text{для } t \in [48,75; 49,25] ; \\ 1 - |t - 49,5| / 0,5 & \text{для } t \in [49; 50] ; \\ 1 - |t - 50| / 0,4 & \text{для } t \in [49,6; 50,4] ; \\ 1 - |t - 50,5| / 0,5 & \text{для } t \in [50; 51] ; \\ 1 - |t - 52| / 2 & \text{для } t \in [50,5; 52,5] . \end{cases}$$

**Рисунок 18.6 - Функції належності термів лінгвістичної змінної «Температура»**

Управління вакуум-випарювальним апаратом здійснюється за наступною системою продукційних правил:



- 1) Якщо  $T$  це  $T_A$  і  $K_{ен}$  – це  $K_{вис}$ , то  $F_{пар}$  – це  $F_A$ ;
- 2) Якщо  $T$  це  $T_B$  і  $K_{ен}$  – це  $K_{вис}$ , то  $F_{пар}$  – це  $F_B$ ;
- 3) Якщо  $T$  це  $T_C$  і  $K_{ен}$  – це  $K_{вис}$ , то  $F_{пар}$  – це  $F_C$ ;
- 4) Якщо  $T$  це  $T_A$  і  $K_{ен}$  – це  $K_{сер}$ , то  $F_{пар}$  – це  $F_B$ ;
- .....
- 20) Якщо  $T$  це  $T_A$  і  $K_{ен}$  – це  $K_{низ}$ , то  $F_{пар}$  – це  $F_A$ ;
- .....
- 36) Якщо  $T$  це  $T_K$  і  $K_{ен}$  – це  $K_{он}$ , то  $F_{пар}$  – це  $F_K$ .

Кількість правил дорівнює добутку кількості термів по витратам пару на кількість термів за коефіцієнтом ефективності. Таким чином, загальна кількість правил дорівнює 36. Лінгвістична змінна «Вологість» використовується в другій системі продукційних правил:

- 1) Якщо  $\lambda$  – це  $\lambda_A$ , то  $F_{\text{пар}}$  – це  $F_A$ ;
- 2) Якщо  $\lambda$  – це  $\lambda_B$ , то  $F_{\text{пар}}$  – це  $F_B$ ;
- 3) Якщо  $\lambda$  – це  $\lambda_C$ , то  $F_{\text{пар}}$  – це  $F_C$ ;
- 4) Якщо  $\lambda$  – це  $\lambda_D$ , то  $F_{\text{пар}}$  – це  $F_D$ ;
- 5) Якщо  $\lambda$  – це  $\lambda_E$ , то  $F_{\text{пар}}$  – це  $F_E$ ;
- 6) Якщо  $\lambda$  – це  $\lambda_F$ , то  $F_{\text{пар}}$  – це  $F_F$ ;
- 7) Якщо  $\lambda$  – це  $\lambda_G$ , то  $F_{\text{пар}}$  – це  $F_G$ ;
- 8) Якщо  $\lambda$  – це  $\lambda_H$ , то  $F_{\text{пар}}$  – це  $F_H$ ;
- 9) Якщо  $\lambda$  – це  $\lambda_K$ , то  $F_{\text{пар}}$  – це  $F_K$ .

Обидві системи продукційних правил складено таким чином, що в кожен момент часу спрацьовує тільки одне правило в кожній з систем. Значення температури отримано за механізмом нечіткого виведення Е. А. Мамдані, детально розглянутого раніш в підручнику

## 18.2. Синтез нечіткого регулятора з лінгвістичним зворотним зв'язком

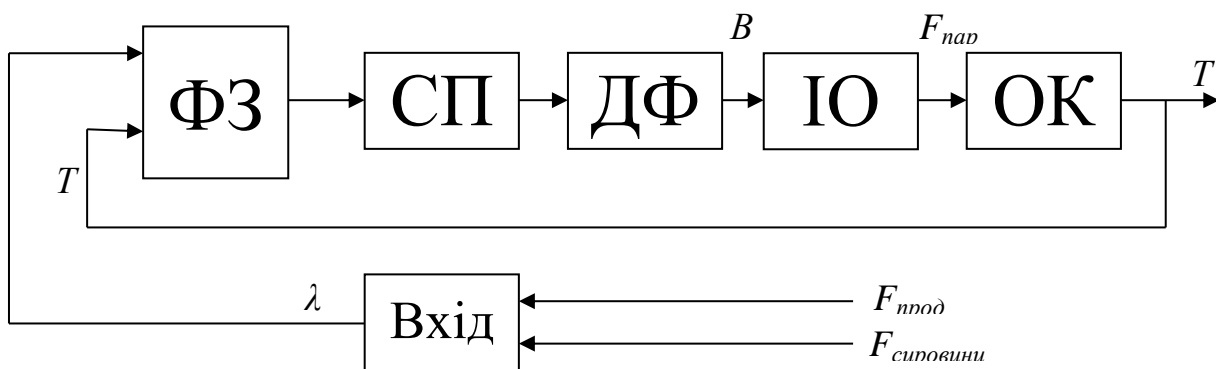
На рис. 18.7 представлено блок-схему нечіткого регулятора. Проведемо оцінку швидкодії такого типу керування. Його особливістю є відсутність чіткого порівнювального пристрою, який для нечіткого регулятора є функціонально надлишковим, оскільки призначений для порівняння безперервних величин, тоді як в нечітких регуляторах використовуються терми лінгвістичних змінних, тобто кінцеве, а не нескінченне число фіксованих значень цих величин.

Регульована величина  $T$  за допомогою фаззифікатора (ФЗ) перетворюється в лінгвістичну змінну «Температура» з термами  $T_A, T_B, T_C, T_D, T_E, T_F, T_G, T_H, T_K$ , які подаються на вхід нечіткого регулятора (СП). Фаззифікацією будемо називати процедуру перетворення чітких даних в нечітку множину.

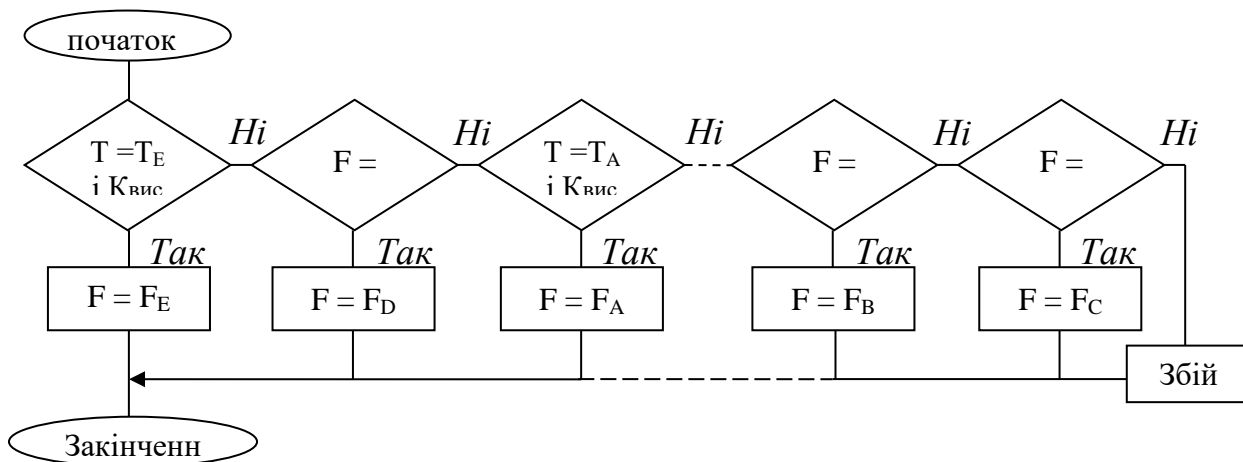
Аналогічним перетворенням піддається параметр  $\lambda$ . Слід зазначити, що абсциси вершин рівнобедрених трикутників рівні чітким фіксованим значенням регульованої величини, що подається у вигляді відповідних уставок на вхід фаззифікатора. На регульований клапан подачі пари (ІС) надходить чітке значення керуючого впливу  $B$ , відповідно до обчислених дефаззифікатором (ДФ) витрат пару, який подається на об'єкт керування (ОК).

Логічна схема алгоритму функціонування пропонованого нечіткого регулятора, яка включає процедуру порівняння в нечіткому форматі поточного значення  $T$  з її фіксованими значеннями, представлена на рис. 18.8. Фактична

тривалість циклу сканування запропонованого нечіткого регулятора залежить від двох обставин: на скільки часто в процесі роботи нечіткого регулятора умови, що містяться в операторах умовного переходу, бувають істинними (частота спрацьовування оператора умовного переходу) і в якій послідовності розміщені символи дії цих операторів. Звідси неважко виявити стратегію розміщення операторів умовного переходу в структурі логічної схеми алгоритму на рис. 18.8. з метою отримання найбільш швидкої дії нечіткого регулятора з лінгвістичним зворотним зв'язком. Швидкодія нечіткого регулятора буде найбільшою (час відгуку найменший), якщо оператори умовного переходу в його логічній схемі алгоритму функціонування будуть розміщені зліва- праворуч в порядку зменшення частоти їх спрацьовування.



**Рисунок 18.7. - Структурна схема регулятора температури у випарувальному апараті з лінгвістичним зворотним зв'язком**



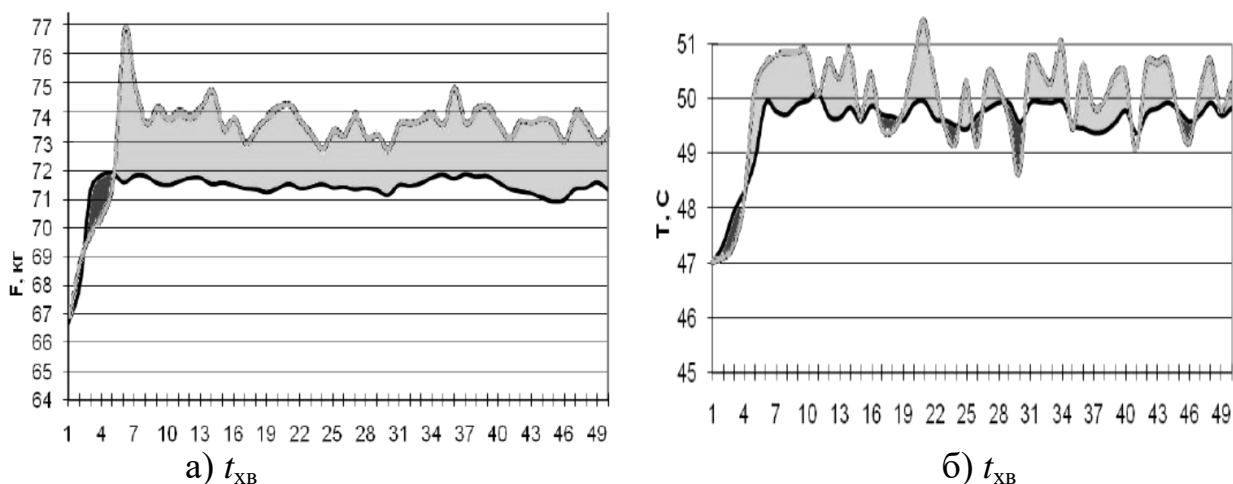
**Рисунок 18.8.- Схема алгоритму функціонування нечіткого регулятора**

Стосовно до логічної схеми алгоритму це означає, що оператор з першою умовою повинен володіти найбільшою, а оператор з другою за послідовністю умовою - найменшою частотою спрацьовування. Кількість умов відповідає кількості продукційних правил і дорівнює 36.

На реальних технологічних установках вельми складно з прийнятною похибкою налаштувати базу правил нечіткого регулятора з лінгвістичним зворотним зв'язком. Звідси виникла необхідність в розробці імітаційної моделі нечіткого управління процесом випарювання з метою швидкого і точного визначення частоти спрацьовування правил і коректності складання системи нечітких продукційних правил для конкретної технологічної установки. Під коректністю в даному випадку розуміється система нечітких правил, в якій в будь-який момент часу тільки одне правило має справжню умовну частину.

За результатами роботи імітаційної моделі в режимі реального часу визначається порядок розташування продукційних правил, що забезпечує найбільшу швидкодію нечіткого регулятора. Ці дані використовувалися для реалізації системи регулювання в пакеті програм SIMATIC Manager V5.4. Пакет включає в себе кілька підпрограм для роботи з контролерами фірми Siemens[42].

Виконано порівняльний аналіз перехідних процесів регулювання витрати пари (рисунок 18.9, а) і температури (рисунок 18.9, б) для вакуум-установки.



**Рисунок 18.9.- Перехідний процес витрати пари (а) і температури (б) в калоризаторі (верхні криві для ПД-, а нижні – для нечітких регуляторів) - випарювального апарату з ПД- і нечітким регуляторами**

Експертні дослідження проводились на автоматизованому робочому місці (АРМ)технолога – оператора, реалізованого на компактній моделі MP227- 10 Touch.

### 18.3. Вибір програмного забезпечення та мікропроцесорів для керування технологічним процесом випарювання молочних продуктів.

Вибір програмного забезпечення потрібно виконати в наступній послідовності:

1. На базі контролера Siemens S313C з використанням пакета SIMATIC Manager потрібно спочатку дослідити програмне забезпечення для керування технологічним процесом виробництва молочних продуктів з точки зору ладаних параметрів якості керування.[42]

2. Вибрати остаточно комп'ютерну техніку і програмне забезпечення фірми Siemens, що відповідає поставленій меті - зниження витрат енергії.

3. З метою розробки інтелектуальної системи управління технологічним процесом випарювання молочних продуктів на базі розробленого нечіткого регулятора провести: а) порівняльний аналіз ПД-регуляторів та нечітких регуляторів щодо заощадження енергетичних параметрів. Одержані результати наведені на рис 18.10 (див. графік залежності витрати пару  $F$  установки з випарювання молока з ПД- (верхній графік) і нечітким (нижній графік) регуляторами)

Аналіз отриманих результатів показує, що нечіткий регулятор забезпечує (нижня синя крива) більш плавне регулювання, ніж ПД-регулятор (верхня червона крива). У наслідок великої амплітуди коливання температури у випарювальному апараті при використанні ПД-регулятора дисперсія вихідних параметрів протікання технологічного процесу знижується, через що в середньому на 10-12% в порівнянні з нечітким регулятором (рис. 18. 10) підвищуються витрати пару за підтримки однієї і тієї ж температури.

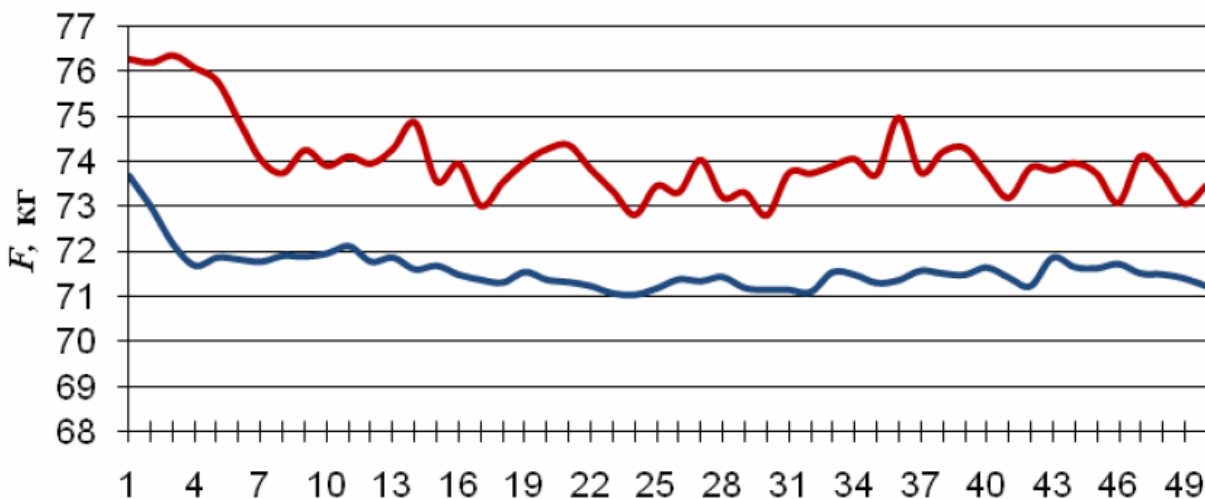
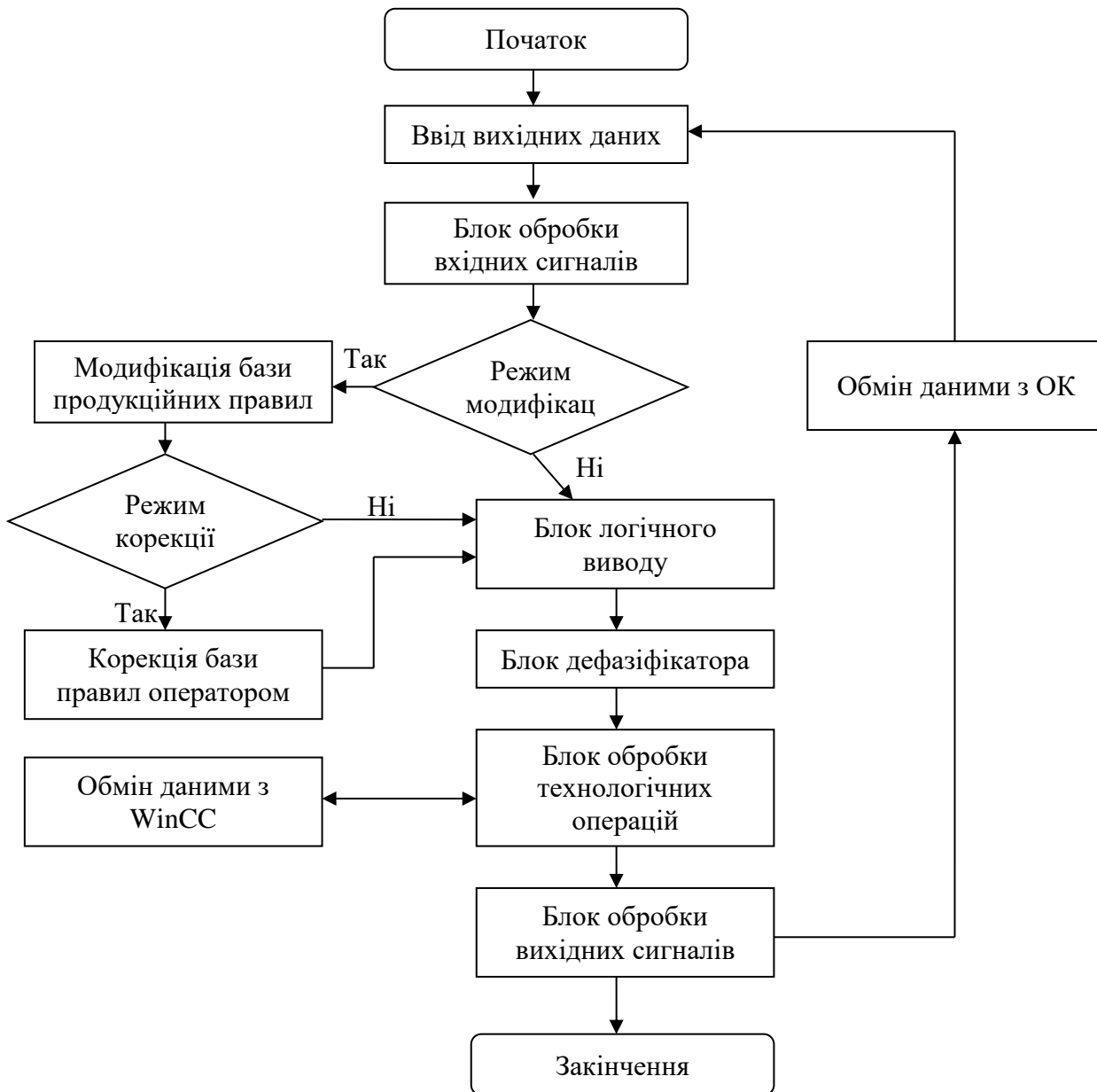


Рисунок 18.10 Результати дослідження двох типів регуляторів.

4. Розробити алгоритм керування процесом випарювання.



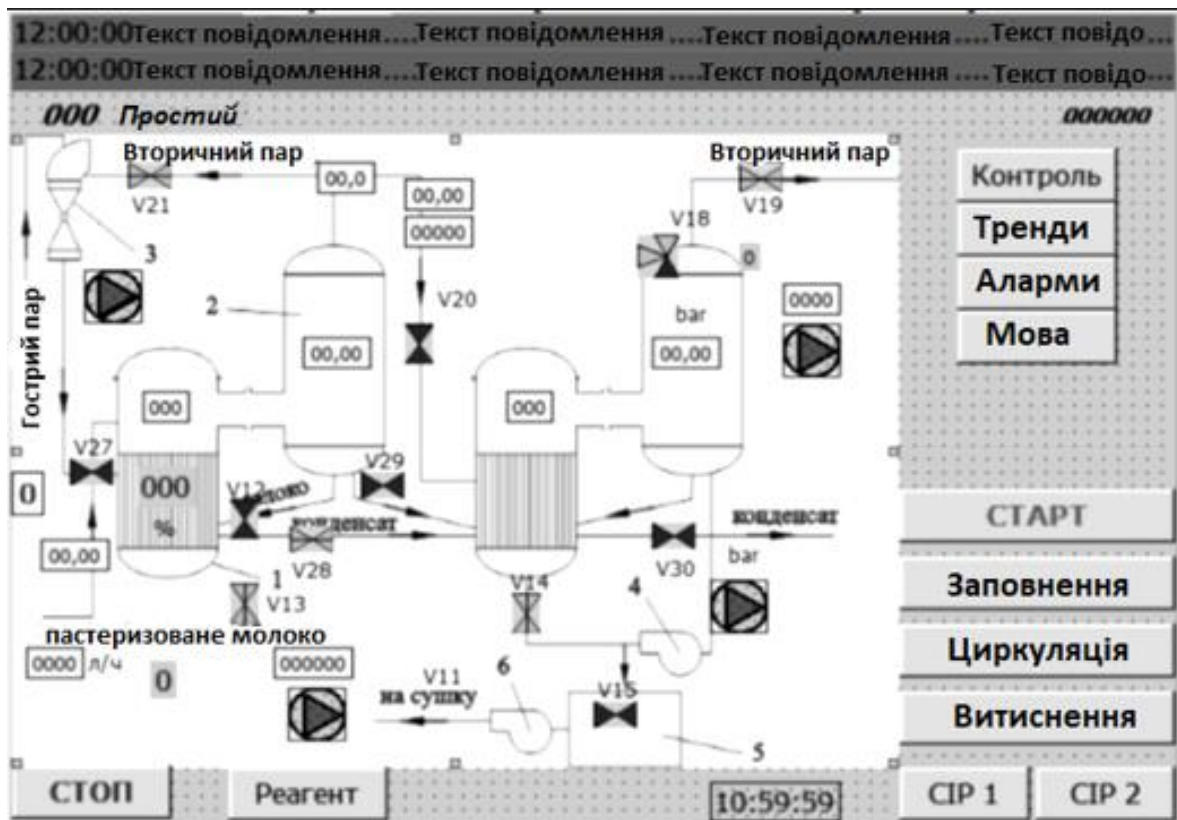


**Рисунок 18.11. - Алгоритм керування процесом випарювання**

На рис. 18.11 представлений алгоритм керування процесом випарювання молочних продуктів. Його особливістю є наявність блоків автоматичної модифікації і корекції бази продукційних правил. Ці блоки працюють спільно з основною програмою і порядок розташування правил в них коригується в режимі реального часу.

5. На основі універсальної структури АСУ ТП розробити інтелектуальну систему керування процесом випарювання молочних продуктів. Така система дозволяє скоротити витрату енергії на 20% і знизити вологість в молочних продуктах до вимог стандартів країн ЄС.

6. Побудувати інтерфейс АРМ технолога - оператора (рис.18.12), що максимально повинен задовольняти вимогам персоналу до систем автоматизованого контролю та інтелектуального керування в харчовій промисловості.



**Рисунок 18.12. - Головна мнемосхема системи інтелектуального керування процесом випарювання**

Отже, спільна реалізація в єдиній оболонці SCADA-системи, що включає програми керування процесом випарювання молочних продуктів і зниження витрат енергії, а також функції автоматичного налаштування системи продукційних правил, дозволяє реалізувати універсальну інтелектуальну систему керування процесом випарювання молока зі зниженням витрат енергії від 18% до 20% від існуючих систем керування з ПД- регуляторами.

### **Контрольні запитання**

1. Поясніть чому основним параметром якості при випарюванні є вологість  $\lambda$ .
2. Поясніть чому проєктанти обрали метод нечіткої ідентифікації процесу випарювання молока.
3. Що таке продукційні правила?
4. Поясніть роботу алгоритма керування процесом випарювання
5. Охарактеризуйте проєктні рішення щодо особливості наявності блоків автоматичної модифікації і корекції бази продукційних правил.
6. Чому ці блоки працюють спільно з основною програмою, а порядок розташування правил в них коригується в режимі реального часу?.
7. Поясніть сутність алармів
8. Дайте своє бачення проєктних рішень щодо спільної реалізації в єдиній оболонці SCADA-системи наступних атрибутів: програми керування процесом випарювання та вибору мнемосхеми ІСУ.

## **Тема 19. Автоматизовані системи управління промисловими холодильниками**

### **19.1. Інтелектуальні системи управління промисловими холодильниками**

Ідея використання інтелектуалізації в системі управління процесами холодопостачання, керування процесами охолодження та заморожування продуктів харчування полягає в створенні об'єднаних інформаційним процесом сукупності технічних засобів, програмного забезпечення, автоматизованих робочих місць операторів- технологів, алгоритмів керування, баз даних, правил і знань та за допомогою ЕОМ в реальному масштабі часу управляти траєкторією виробництва холоду.

Такі системи не лише оптимізують режими роботи холодильних машин та режимів холодопостачання, але і за рахунок використання мікропроцесорних систем керування (нижній рівень), АРМ АСУТП холодної ланки (середній рівень), ситуаційних центрів інтелектуального управління (ЦІУ) (верхній рівень) та програмного забезпечення (ПЗ), БЗ, БП, БОД, алгоритмів нечіткого керування з нечіткими регуляторами з інтелектуальними пристроями вимірювання та інтелектуальними виконавчими механізмами, відпрацьовують операції пуску- зупинки холодильних машин (ХМ), контролю, сигналізації, розпізнавання технологічних ситуацій, аварій та аварійних ситуацій, а отже мінімізують затрати енергії та вплив на навколишнє середовище у виробництві холоду.

Інтелектуальна система управління промисловим холодильником наведена на рис.19.1. Для виробництва холоду проєктанти використали парокомпресорні холодильні машини.[29,33,34] Інженерне обладнання повинно включати наступні локальні системи керування:

- системи автоматичного керування холодопродуктивністю компресора або групи компресорів;
- систему автоматичного керування роботою випарника і конденсатора;
- система пуску компресора(компресорів);
- захист від перегріву і перевантаження компресора і обладнання ХМ;
- захист від низького тиску в системі;
- комплект апаратури для вимірювання параметрів: комплект манометрів, термометрів для візуального контролю тиску і температури в компресорі та апаратах холодної машини; вимірювальні вікна для візуального контролю рівня холодної агента у випарнику та конденсаторі;
- перевірка напрямку обертання ротора компресора;
- система контролю і регулювання параметрів змащування компресора;
- систему контролю і керування режимом роботи вентиляторів повітряного та насосів водяного конденсаторів;
- захист від швидкого повторного включення компресора при циклічному режимі його роботи;

- підігрів картера компресора в зимовий період;
- систему захисту випарника від заморожування і прогрівання його при замерзанні;
- мікропроцесорні системи автоматизації і контролю роботи компресора та обладнання ХМ, у тому числі регулювання за допомогою терморегулюючого вентиля ступеня перегріву холодоагента після випарника ;
- систему контролю стану і ступеня очищення холодоагента;
- сучасні системи сигналізації про відключення та включення компресора (компресорів); про виникнення високого або низького тиску; про роботу вентиляторів (насосів) конденсатора; випадкової затримки включення компресора; стан контурів тощо.
- дисплей для візуалізації режимів роботи компресорів холодильних машин, ПЗ для графічного забезпечення інформацією ОПР та АРМ технолога – оператора;
- систему контролю параметрів гідромодуля, забезпечення циркуляцією води або холодоносія через випарник і подачі їх споживачу холода;
- засоби контролю параметрів і регулювання температури холодоносія на виході із випарника;
- реле контролю величини потоку холодоносія через випарник ( з метою запобігання його замерзання);
- система автоматизації лінії вприску рідкого холодоагенту для охолодження гвинтового компресора мокрого стиснення і т.п. Кожний із перерахованих вище елементів інтелектуальної системи керування нижнього рівня має свої динамічні та статичні робочі характеристики, які потрібно враховувати при проектуванні адаптивних нечітких регуляторів.

У процесі проектування розподілених нечітких АСУТП виробництва холоду необхідно за допомогою ситуаційного центру інтелектуального управління забезпечити холодопостачання на різних рівнях виробничих ситуацій, а саме:

ситуація 1 рівня характеризується керуванням лише одним компресором, при цьому забезпечуються функції керування, контролю за безпекою, регулювання холодопродуктивності і втручання ДП-холодильщика у випадку аварійної ситуації (аварії);

ситуація 2 рівня полягає у керуванні двома компресорами, при цьому до попередніх функцій додається керування узгодженою роботою компресорів;

ситуація 3 рівня полягає у керуванні машинною залогою, до набору функцій ситуації 2 додаються ще керування та нагляд за роботою насосів для холодильного агента, регулювання сепараторів рідини та теплообмінників;

ситуація 4 рівня представляє собою управління всією ХМ, включаючи контури охолодження, що створює додаткові функції (розморожування випарників, контроль за температурою, тиском і т.п., а також захист ХМ від аварійних ситуацій).

В умовах інтелектуального керування виробничими ситуаціями 1-4 рівнів ОПР підприємства-холодильника приймає рішення щодо оптимізації режимів

холодопостачання охолоджуваних камер для зберігання харчових продуктів підприємства. У цьому випадку в роботу включається центр інтелектуального управління (ЦІУ) підприємства-холодильника (рис. 19.1).

Основними функціями ЦІУ є наступне:

- керування обладнанням у відповідності з денним графіком з цифровим доступом і оперативним програмним забезпеченням (ОПЗ);
- управління енергією;
- захист обладнання, інформації й персоналу за допомогою спеціального обладнання від кібератак, контроль доступу до інформації;
- діалог людина/машина на зрозумілій мові з візуалізацією й запитом, що забезпечує виведення на друкувальний пристрій або монітор параметрів, значень, показників вимірювальних датчиків, сигналів про негаразди, час роботи, положення ВМ регулювання або керування, схем, значень перевищення граничних рівнів;
- можливість впливу на ВМ за допомогою центрального пульта (ЦП), а також різних погодинних, спеціалізованих, автоматичних, математичних або реагуючих на збурення програм;
- збереження інформації для оброблення або архівування;
- оброблення в інформаційному режимі будь-яких значень, які можуть бути представлені у формі графіків або іншої інформації, а також функцій керування та розрахунку стосовно цих величин.

Завдяки ЦІУ та інформаційного забезпечення технічного персоналу відомостями про аномалії в роботі систем холодопостачання, визначення місць їх виникнення, в ОПР є можливість своєчасного прийняття рішень. Крім цього ЦІУ, що працює в режимі авторегулювання і автопідлаштування дозволяє у сполученні з раціональним централізованим керуванням компресорними установками ХМ значною мірою економити енергію в результаті підвищення ефективності, оптимізації часу роботи ХМ. Все це забезпечує більш тривалий термін експлуатації обладнання та більш швидко окупність ХМ.

Відзначимо, що завдяки ЦІУ топ-менеджери холодильного підприємства одержують інформацію в режимі реального часу, що дозволяє організувати роботу ХМ в оптимальному режимі за рахунок адаптивних нечітких систем керування компресорами, конденсаторами та випарниками. Тобто забезпечити тараєкторію виробництва холоду за рахунок роботи автоматизованих пристроїв та забезпечити всі експлуатаційні якості ХМ. Завдяки ЦІУ ОПР одержують інформацію про кількісні параметри споживаної енергії, про обладнання, що потребує обслуговування, і, головним чином, про необхідність його модернізації. Звідси слідує, що ситуаційний центр інтелектуального управління дозволяє за рахунок систем MES, ERP керувати оперативним і стратегічним плануванням підприємства-холодильника.

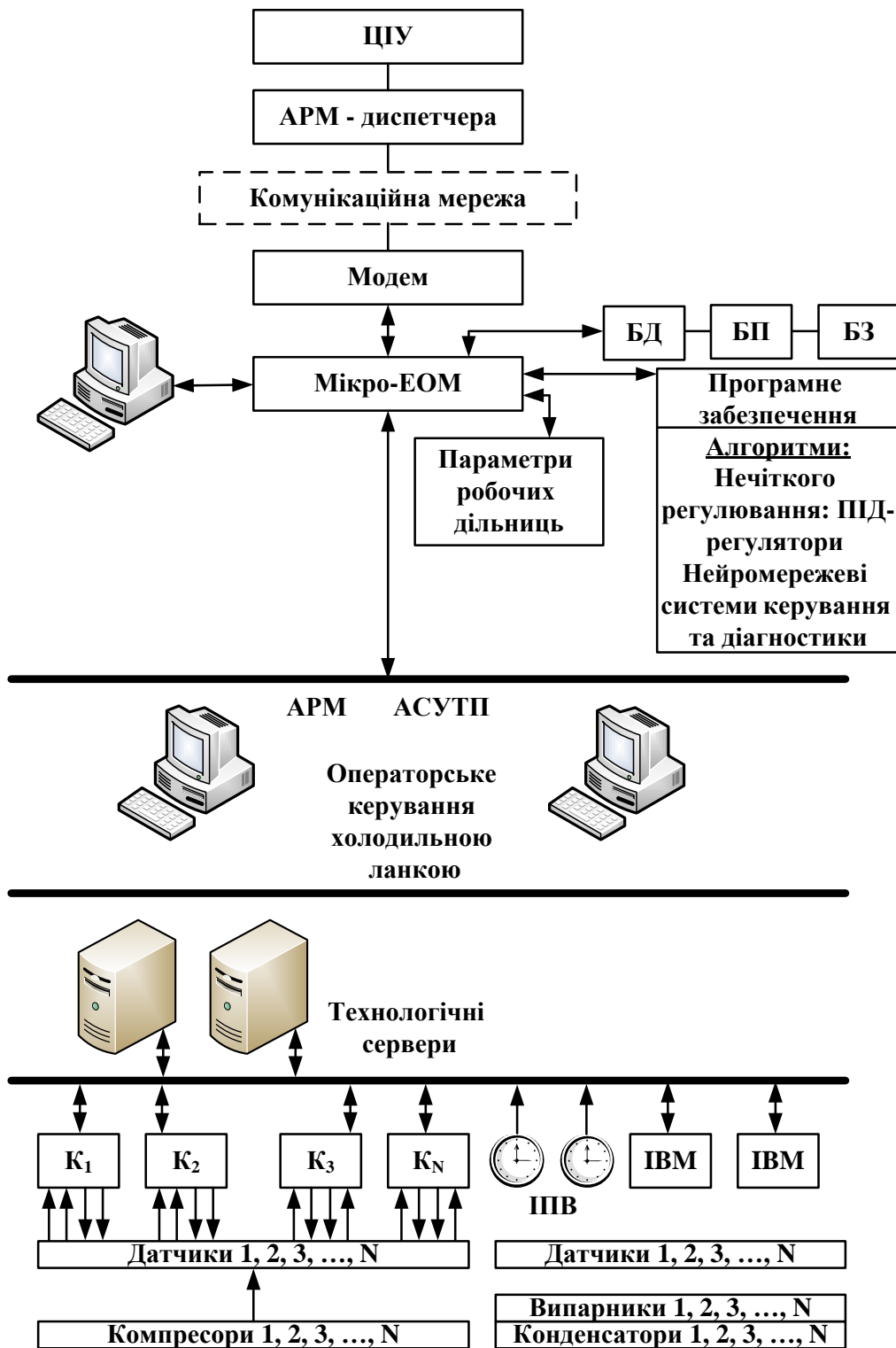
В якості АРМ-оператора найчастіше використовуються промислові персональні комп'ютери, які мають підвищені показники захисту обладнання від шкідливих впливів навколишнього середовища- вологи, пилу і температури.

У нашому випадку-SIMATIC Panel PC. Даний комп'ютер SIMATIC S7 слугує для позиціонування підрахунку подій, масштабування і керування ВМ холодильних машин та систем холодопостачання.

Рішення задач диспетчерського керування промисловими холодильниками можливо за допомогою програмних продуктів PISystem компанії OSIsoft, лінійки програмного забезпечення GE Digital, програмного продукту GIDRA компанії MPDV, програмне забезпечення Ingocofot. АРМ АСУТП промислового холодильника одержує інформацію від підсистеми моніторингу стану обладнання робочих дільниць. Підсистема призначена для забезпечення візуалізації і контролю стану технологічного обладнання в режимі 24/7 (24 за добу, 7 днів за неділю) тобто цілодобово і безперервно.

Система дає можливість реалізувати презентацію з різним ступенем деталізації: від відображення на єдиній схемі групи дільниць з розподіленням обладнання (холодильних камер і систем холодопостачання) до візуалізації з точністю до окремого елемента або конкретної дільниці (компресорні станції). АРМ-диспетчера промислового холодильника обладнана відео-стіною. Вона розміщена в приміщенні диспетчерського пункту промислового холодильника. Відео-стіна представляє собою набір встановлених рідино-кристалічних (РК) панелей, кожна із яких має діагональ 40 дюймів і разрешение не гірше 1366 на 766 пікселів.

Управлінська Мікро-ЕОМ побудована на базі персонального комп'ютера промислового виконання, який підключено до сервера-джерела даних системи технічного контролю і керування холодильним обладнанням промислового холодильника великої потужності.



**Рисунок 19.1. – Загальна функціональна схема автоматизації сучасного промислового холодильника (холодильної ланки):**  
**ЦІУ – центр інтелектуального управління; ІВМ – інтелектуальні виконавчі механізми; ІВМ – інтелектуальні пристрої вимірювання**

## 19.2. Нечітке керування процесами холодопостачання промислових холодильників

Холодильні установки і об'єкти холодопостачання, що обслуговуються ними, знаходяться в умовах безперервних впливів зовнішніх і внутрішніх збурюючих факторів, які характеризуються змінними параметрами і залежать від часу. Аналіз системного впливу тих чи інших змінних факторів на елементи системи холодопостачання будемо виконувати за допомогою нечіткого синтезу нелінійного об'єкта керування.

У сфері адаптивного керування ХМ існує декілька варіантів використання нечіткої логіки. Найпростіший із них – з регулюванням робочих параметрів ХМ на базі нечіткого регулятора (НР-контролера), що має адаптивні властивості та може забезпечити оптимальні параметри холодопостачання в часі.

Структурна схема системи з НР-контролером наведена на рисунку 19.2.

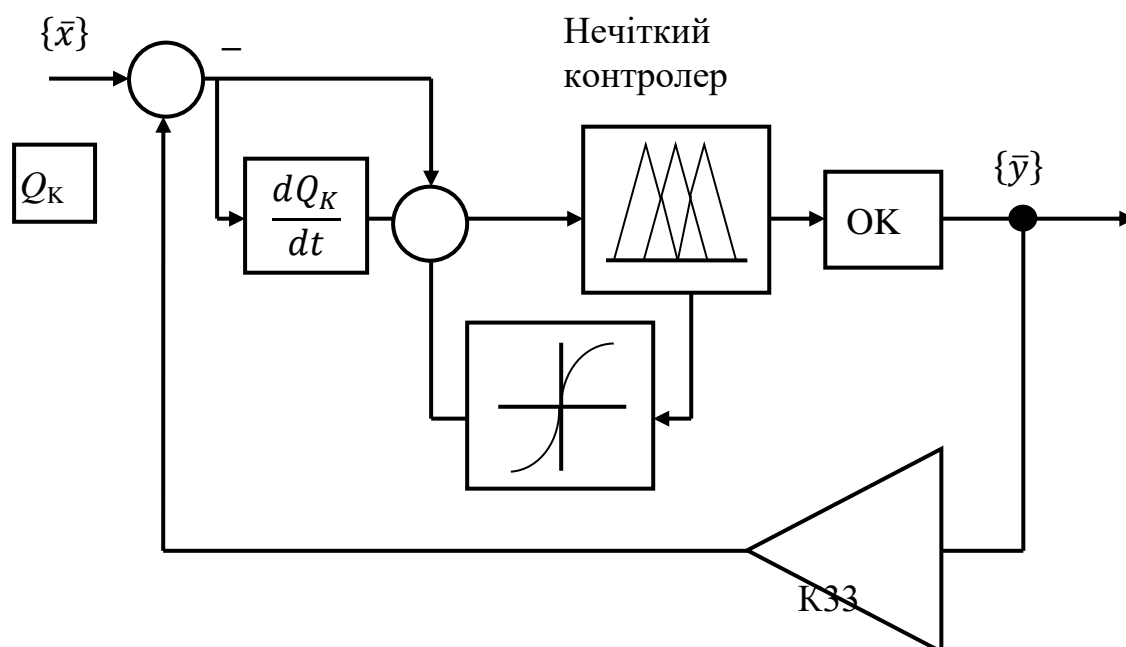


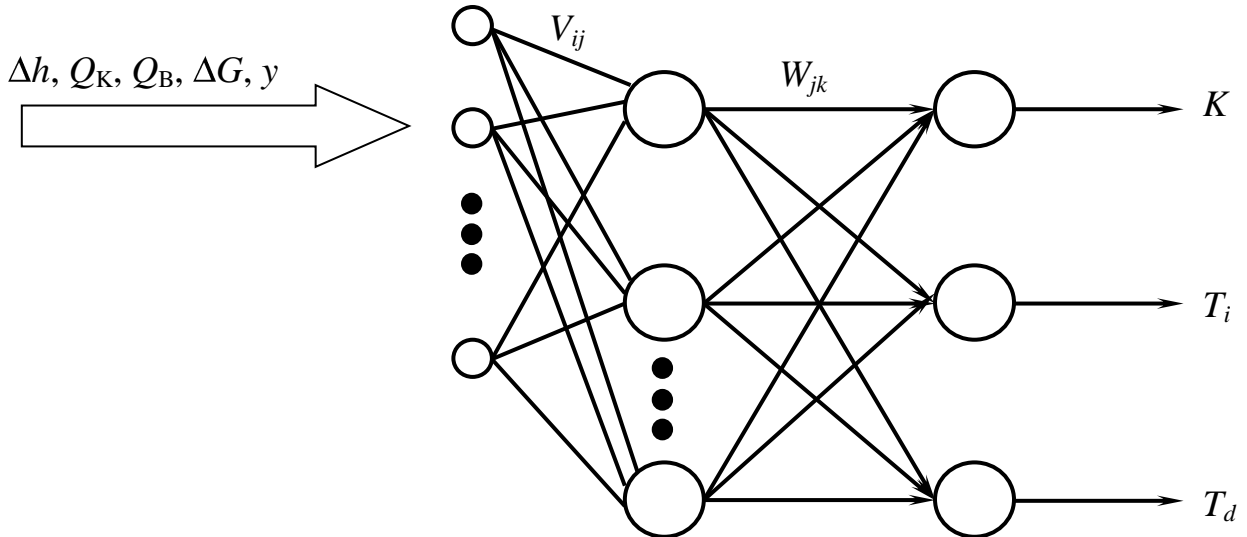
Рисунок 19.2. – Структурна схема системи керування ХМ з нечітким регулятором

На схемі у вектор вхідних величин  $\{\bar{x}\}$  нечіткого контролера введено додатковий корегуючий зв'язок за динамікою перехідного процесу, характер і параметри якого задаються за допомогою функціонального перетворювача (ФП). При цьому зміни параметрів ФП дозволяють корегувати як динамічні, так і статичні характеристики системи. Така структура регулятора в поєднанні з оптимальним визначенням параметрів БЗ НК дозволяє проєктанту при мінімумі налагоджень реалізувати АСК невизначеними і нестационарними об'єктами незалежно від їх структури [1,8,9, 17,36].

На відміну від нечіткого регулятора, де експерт повинен сформулювати правила налагодження в лінгвістичних змінних, у випадку використання нейронної мережі експерту достатньо декілька разів самому налагодити



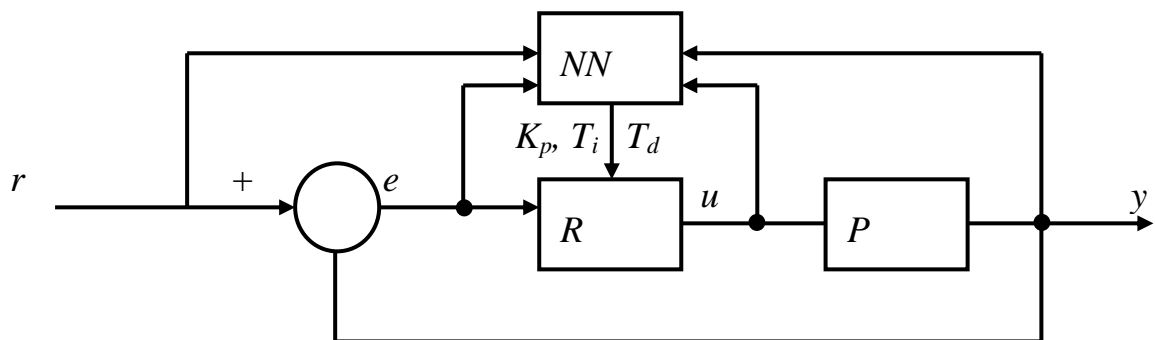
регулятор в процесі «навчання» нейронної мережі [8,20,27,31]. Вона складається із множини зв'язаних між собою нейронів (рис. 19.3), а кількість зв'язків може складати тисячі. Завдяки нелінійності функцій активації і великій кількості налагоджуваних коефіцієнтів НМ може виконувати достатньо точне нелінійне відображення множини вхідних сигналів у множини вихідних.



**Рисунок 19.3. – Структура НМ в блоці авто налагодження ХМ**

Типова структура САР компресора ХМ з ПД-регулятором і НМ в якості блоку авто налагодження наведена на рис. 19.4. Нейронна мережа *NN* в даній структурі відіграє роль функціонального перетворювача, який для кожного набору сигналів  $\Delta h$ ,  $Q_K$ ,  $Q_B$ ,  $y$ ,  $\Delta G$  визначає коефіцієнти ПД-регулятора  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ . найбільш складною частиною в проектуванні регуляторів з нейронною мережею є процедура «навчання» мережі, що полягає в ідентифікації невідомих параметрів нейронів  $W_i$ ,  $a$  та  $b$ .

Тривалість процесу «навчання» є основною вадою на шляху використання методів НМ в ПД-регуляторах. Ішим недоліком НМ є складність прогнозування помилки регулювання для впливів, які не входили до набору навчаючих сигналів, а також відсутність критеріїв вибору кількості нейронів у мережі, тривалість навчання, діапазон й кількість впливів, які навчають систему.



**Рисунок 19.4. – Структура ПД-регулятора з блоком автоматичного налагодження на основі нейронної мережі**

### 19.3. Нечітке керування холодозабезпеченням обладнання супермаркета

Розглянемо деякі приклади інтелектуального управління виробництвом холоду і холодопостачанням. На рисунку 19.5 наведено схему АСУ-АСУТП холодозабезпечення супермаркета.

Спочатку розглянемо автоматизацію процесів нечіткого керування острівними прилавками на основі холодильних вітрин. Усі супермаркети мають вітрини-холодильники й холодильні камери, економічна робота яких може бути забезпечена лише за допомогою систем адаптивного керування.

Розглянемо цей приклад проєктування за допомогою нечітких автоматизованих систем управління виробництвом холоду і його холодопостачанням. У таких системах мікро-ЕОМ є «мозком» кожної холодильної камери, в якій розташовані годинники високої точності.

Мікро-ЕОМ керує:

- регулюванням холодопродуктивності;
- сигналами щодо розморожування;
- негараздами в системі забезпечення холодопостачання.

ПЗ системи дозволяє створити інтерактивний діалог ОПР з ЕОМ. Всю інформацію одержує мікро-ЕОМ через ПЗО та спеціальні ПЛК (плати А, В) за допомогою ПШ від температурних датчиків  $D_1, D_2, \dots, D_N$  кожної вітрини.

Плата В з ПЛК керує також завданням температури та інформацією про негаразди, які із нею пов'язані. Ці ПЛК керують  $V$  – реле розморожування (плата В), які в свою чергу керують групою електромагнітних пристроїв (вимкн/вмк + контактор), що знаходяться в кожній вітрині з метою забезпечення електричного розморожування. Додатковими функціями системи є: регулювання добового теплового режиму за допомогою нічних шторок або заслінок; електричне регулювання за допомогою стрічкових нагрівачів; діагностичні функції, які виконуються за допомогою ПЛК і пульта АРМ; спеціальні види повідомлень про негаразди (засолення водяних трубопроводів і т.п.); електронне узгодження роботи регулюючого вентиля і регулятора швидкості.

Реле  $P_A$  на платі А сигналізує про негаразди в системі керування процесом заморожування з ПЛК (охоплює 10 видів негараздів на холодильній дільниці), сигналізує також про негаразди у машинній залі за допомогою мікро-ЕОМ та АРМ дисплея диспетчера на АРМ. АРМ диспетчерського пункту забезпечене ПЗ і довідниковою базою та оснащене друкувальними пристроями, що видають інформацію про негаразди в системі холодопостачання вітрин конкретним спеціалістам.

При розпізнаванні негараздів (що можуть бути зафіксовані та оброблені в РЧ) мікро-ЕОМ надсилає АРМ-технологу й холодильщику інформацію про обслуговування тієї чи іншої холодильної дільниці супермаркету. Диспетчер-холодильщик може оцінити, виходячи із БД, можливі аварійні ситуації і відпрацювати команди дистанційного керування.

Функції дистанційного керування за негараздами та дистанційного консультування підтримуються за допомогою ІШ, яка зв'язує групу плат А з інтерфейсною платою. негаразди у машинній залі обробляються мікро-ЕОМ, що одержує інформацію з плат А, В. Інтерфейсна плата може бути продубльована в іншому приміщенні супермаркету, вона дозволяє зібрати у диспетчера-холодильщика інформацію про температури і негаразди на холодильних дільницях і в машинній залі. До неї можуть бути приєднані друкувальні пристрої і модем. Події на дільницях холодильних постів (обладнання з позитивною температурою, морозильне обладнання, холодильні камери з позитивними температурами, холодильні камери з мінусовими температурами), так як і негаразди в машинній залі, передаються на АРМ диспетчера-холодильщика.

Крім цього мікро-ЕОМ та ОПЗ диспетчер-холодильщик одержує усі значення параметрів постів «холоду» (температури, розморожування, перелік негараздів (неполадок), параметри регулювання і т.п.), а при необхідності диспетчер-холодильщик може за допомогою ОПЗ впливати на режими роботи холодильних камер. Конфігурація дистанційного керування в системі СІУ виконана на основі сучасних мікро-ЕОМ, ПЛК і інтерфейсів RS485/RS232 та АРМ диспетчера.

Використовуючи бібліотеку кольорових графічних позначень для кожної холодильної вітрини (групи холодильних вітрин), мікро-ЕОМ керує холодопостачанням, водопостачанням надає на АРМ диспетчеру-холодильщику в реальному масштабі часу зміни контрольованих параметрів у часі: роботи компресорів  $K_1, K_2, K_3, \dots, K_N$ ; параметри системи електропостачання (СЕ), тощо.

Ситуаційний інтелектуальний центр (СІЦ) супермаркету разом з АСУ, MES- та ERP-системами утворюють адміністративний рівень управління (систему верхнього рівня управління організації). АРМ топ-менеджерів супермаркету керує бізнеспроцесами, контролює в РЧ потоки грошей, виконує оперативне і стратегічне планування, а також одержує інформацію через промисловий Інтернет-речей (ІоТ) зі споживачами та постачальниками продукції.

До переваг нечітких способів керування, що відносяться до категорії ІСУ холодопостачанням, можна віднести такі можливості:

- реалізувати будь-який необхідний для процесу нелінійний алгоритм керування;
- мати неповний, приблизний опис ОК, а для НМ відсутність опису;
- фаззи-логіка не потребує великих обчислювальних потужностей.

Таким чином, побудова НСК на базі нечіткої логіки є найбільш прогресивним варіантом реалізації адаптивних систем безпечної експлуатації ХМ.

## 19.4 Методи моніторингу обладнання холодильних систем промислових холодильників

Об'єкт моніторингу представляє собою сукупність п – багатоступеневих компресорних холодильних машин( діагностичний вузол), холодоносіїв, каналів холодопостачання, холодильних камер промислового холодильника. Типова система моніторингу складається із каналів розповсюдження, системи моніторингу, системи датчиків, блоків узгодження, трактів керування, трактів розпізнавання, аналізаторів, блоків формування діагностичних ознак, блоку прийняття рішень, блоків оповіщення, відображення і реєстрації, блоків мережевих інтерфейсів(intranet|Internet), інформаційної бази даних і знань, блока керування і синхронізації.

У той же час пропонуємо проєкт системи моніторингу промислового холодильника з блоком прийняття рішень ОПР на основі вхідного масиву діагностичних ознак і експлуатаційних даних, які зберігаються в інформаційній системі, БЗ, БД і, які визначають технічний стан об'єкту моніторингу.

Отже, рекомендуємо на кожному промисловому холодильнику та супермаркетингу впроваджувати сучасні системи моніторингу стану холодильного обладнання. Розглянемо приклад системи моніторингу холодильної системи, виконаної на базі панелі оператора TP700 Siemens S1200.

В системі автоматичного контролю оператори через АРМ контролюють наступні параметри: циркуляцію холодоносія, показники давачів тиску, вібрацій, температуру ХМ, температуру в холодильних камерах і якість продукції. Система працює за стандартами країн ЄС у вигляді системи моніторингу і диспетчеризації холодозабезпечення холодильних камер промислових холодильників. Іншим прикладом проєктних рішень системи моніторингу є контроль параметрів температури і частоти вібрацій ХМ, які можуть інформувати ОПР про ознаки виходу обладнання ХМ-холодопостачання-холодильних камер промислового холодильника із ладу. В системі передбачено захист двигунів ХМ від перевантаження по струму та коротких замикань, перевищеної та пониженої напруги, перекосу фаз, пропадань фази. Тому в АСУТП промислового холодильника необхідно проєктувати системи діагностики холодильного обладнання на базі існуючих АСК, Промислового Інтернет-речей та системи контролю працездатності обладнання ХМ, датчиків і станцій LoRaWAN.

Контроль вібрації підшипників компресорів ХМ та якості мастила для них дозволяють зменшити кількість аварійних ситуацій. Якщо підшипники недостатньо змазані, через тертя компресор нагрівається і починає більше вібрувати, що призводить до аварійних ситуацій та непланових ремонтів обладнання.[29, 33,53, 54,64].

Промислові системи контролю LoRaWAN з датчиками температури, вібрацій, тиску дозволяють контролювати:

-температурні режими роботи ХМ, тиск і температуру робочої речовини, яка направляється в конденсатор КД, де конденсується за рахунок відведення теплоти в навколишнє середовище;

- температурні режими і тиск робочої речовини у випарнику та питому масову холодопродуктивність;

- температурні режими роботи електроприводу компресорних машин та насосів( температура нагріву обмоток електродвигунів та їх підшипників);

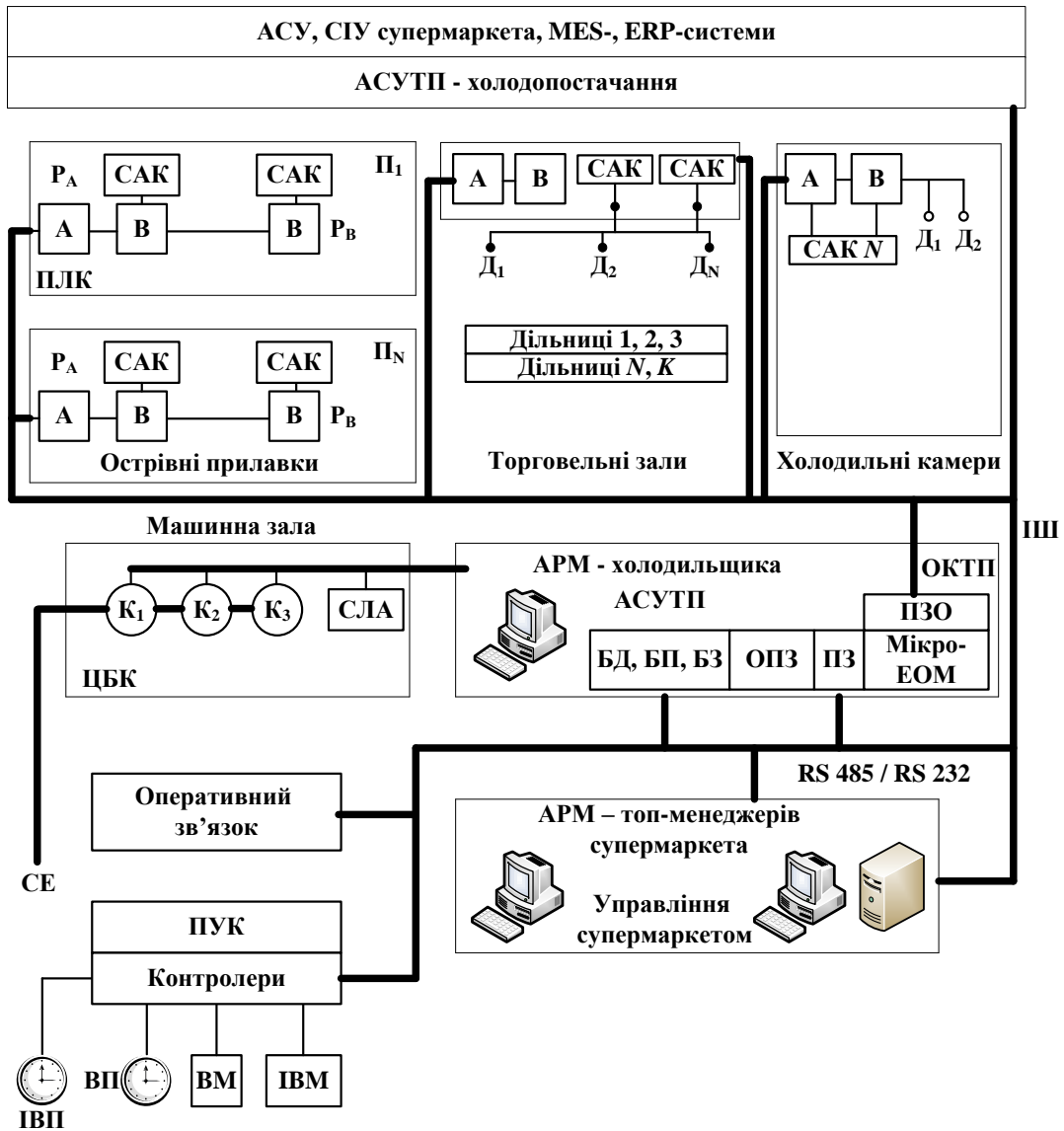
- якість заморожування продукції та її температуру.

Відмітимо, що LoRaWAN- це протокол передачі даних, який раціональний в умовах вимірювання вібрацій, температури, тиску робочої речовини холодильного обладнання з розумними датчиками одержання інформації про стан навколишнього середовища, яка не займає великий об'єм даних. В якості датчика температури та вібрацій проєктанти використали Netvok R718E.

Маючи оптимальні та критичні значення температури та частоти вібрації, а також тиску і холодопродуктивності холодильного обладнання з використанням IoT, спроектуємо бездротову систему діагностики холодозабезпечення холодильних камер промислового холодильника. Серцем будь-якого проєкту Інтернету-речей (IoT) є його софтверна складова. Для проєкту системи моніторингу обладнання холодильних машин- це LoRaWANNETWORK Server, що забезпечує спілкування між собою датчиків, актуаторів і базових станцій.

LNS також передає інформацію до LoRaWANApplicaninServer (LAS), який відповідає за бізнес- логіку. Зв'язка LNS- LAS, як правило працює по MQTT протоколу, забезпечуючи таким чином універсальність обміну інформації з датчиками і системами контролю та ОПП.

Для передачі інформації з LAS Things Board PE далі в SCADA з підтримкою OPCUA (наприклад, Siemens WinCC Scheinder Electric Tco Struxure або Open SCADA) використовується механізм інтеграції, який забезпечує двонаправлений обмін інформації OPC UA Server- LAS в мережі IoT холодозабезпечення промислового холодильника. LaRaWAN –мережа дозволяє також підключати датчики руху, контролю відчинення дверей тамборів і холодильних камер, а головне за допомогою датчиків струму контролювати витрати електрики на кожній стадії виробництва холоду та холодопостачання. Використання в системі моніторингу технологій Індустріального Інтернет речей (IoT) дозволяє ОПП постійно одержувати інформацію про стан компресорного обладнання і холодозабезпечення холодильних камер, збільшити горизонт прогнозування відмов обладнання. В системі діагностики ХМ передбачено використання штучного інтелекту з метою обробки масиву даних і розпізнавання та прогнозування АРМ-диспетчера аварійних ситуацій, аварій тощо. Інтелектуальний принцип роботи датчиків дозволяє експлуатувати систему збору даних без технічного обслуговування протягом тривалого часу, оптимізуючи параметри холодопостачання та забезпечуючи високу надійність обладнання, а отже якість продукції заморожування-охолодження.



**Рисунок 19.5. – АСУ-АСУТІІ супермаркета:**

А, В – плати ПЛК; САК – система автоматичного контролю 1, 2, N;  
 ЦБК – центральний блок компресорів  $K_1, K_2, K_3, \dots, K_N$ ; СЛА – система локальної автоматизації з адаптивними нечіткими регуляторами;  
 ПЗО – пристрій зв'язку з об'єктом; СЕ – система електропостачання компресорів  $K_1, K_2, K_3, \dots, K_N$ ; ПУК – пульт керування компресорами  $K_1, K_2, K_3, \dots, K_N$ ; ОКТП – операторське керування технологічним процесом;  
 ВП – вимірювальні прилади; ІВП – інтелектуальні вимірювальні прилади;  
 ВМ – виконавчі механізми; ІВМ – інтелектуальні виконавчі механізми

### **Контрольні запитання**

1. *Що є об'єктом керування в процесах виробництва холоду.? Призначення АСУТП холодозабезпечення.*
2. *Система автоматизованого керування компресором*
3. *Система автоматизованого керування конденсатором*
4. *Структура мікропроцесорних засобів керування процесом холодопостачання.*
5. *Які основні компоненти АСУТП холодопостачання холодильних камер промислових холодильників?*
6. *Динаміка роботи АСУТП холодопостачання промислового холодильника м'ясокомбіната.*
7. *Самостійно спроектуйте систему моніторингу та автоматичного контролю робочих параметрів холодильних машин на базі технологій промислового інтернету речей, базових станцій LoRaWAN, датчиків вібрацій, тиску, температури, холодопродуктивності.*
8. *Наведіть основні вимоги до АСУТП холодильних підприємств.*
9. *Які системи автоматизації підвищують безпечну експлуатацію холодильних машин?.*

## РОЗДІЛ 6. САМОСТІЙНА РОБОТА СТУДЕНТА

### Тема 20. Самостійна та індивідуальна робота здобувача вищої освіти

Самостійна робота здобувача вищої освіти в процесі самостійного вивчення курсу «Автоматизація виробничих процесів харчових технологій» з використанням обов'язкових джерел [1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9] на протязі семестру дозволяє:

- одержати нові знання, навички та вміння з курсу лекцій;
- створити особисті уявлення про сучасні напрямки розвитку інтелектуальної автоматизації, робототехніки та смарт-технологій керування виробництвом продуктів харчування.

**Тест 1.** Автоматизація виробництва – це етап: 1. механізації та роботизації процесів виробництва харчів; 2. машинного виробництва продукції; 3. звільнення людини-оператора від безпосереднього виконання функцій керування технологічними процесами; 4. заміни людини автоматом або роботом. Вірна відповідь.

**Тест 2.** Технологічний – процес це: 1. сукупність операцій та виробничих систем; 2. сукупність операцій над початковою сировиною в технологічних апаратах з метою отримання продукції зі заданими властивостями; 3. сукупність технологічних апаратів з мережею автоматичних пристроїв для переробки сировини; 4. технологічний ланцюг апаратів, механізмів і роботів з метою виробництва продукції. Вірна відповідь.

**Тест 3.** Технологічні параметри характеризуються: 1. робочими характеристиками технологічних апаратів; 2. номінальними і поточними параметрами; 3. змінними чинниками; 4. поточними параметрами, які змінюються в часі. Вірна відповідь.

**Тест 4.** Керування – цілеспрямована дія на технологічний процес яка: 1. забезпечує оптимальний режим роботи технологічного апарату; 2. забезпечує оптимальний чи заданий режим роботи об'єкту керування; 3. процес компенсації збурень та неузгодження системи автоматизації з технологічним процесом; 4. оптимальний режим роботи технологічного процесу, щодо виробництва продуктів харчування. Вірна відповідь.

**Тест 5.** Автоматична система регулювання (АСР) складається із наступних елементів: 1. АР- автоматичного регулятора, ОК- об'єкта керування, КП- компенсуючого пристрою; 2. що формують процес керування на основі сигналів неузгодження; 3. які сумують сигнали неузгодження; 4. які відносяться до нижнього рівня керування. Вірна відповідь.

**Тест 6.** Об'єкт керування або регулювання – це: 1. технологічний процес; 2. агрегат; 3. робототехнологічний комплекс; 4. технологічний процес чи агрегат, в якому відбувається перетворення речовини (сировини) в продукцію. Вірна відповідь.



**Тест 7.** Принцип регулювання за Пенселе-це: 1. принцип автоматизації складних технологічних процесів; 2. принцип регулювання за збуренням; 3. принцип оцінки неузгодження; 4. оцінка навантаження. Вірна відповідь.

**Тест 8.** Процес функціонування АСР полягає в наступному: 1. найкраще виконання завдання для АСР; 2. досягти максимальну точність для АСР; 3. з максимальною точністю підтримувати Узад. і повністю компенсувати дію всіх збурень; 4. у реальних умовах АСР використовують низку показників якості її роботи. Вірна відповідь.

**Тест 9.** Що є критерієм керування для АСР: 1. прибуток чи мінімізація енерговитрат; 2. продуктивність чи собівартість; 3. мінімум неузгодження; 2. оптимальний режим роботи об'єкта керування (ОК). Вірна відповідь.

**Тест 10.** Критерій керування – це: 1. технологічний параметр (неузгодження); 2. техніко-економічний показник; 3. показник, який характеризує в цілому якість роботи технологічного ОК; 4. математична модель в системі керування об'єктом. Вірна відповідь.

**Тест 11.** Що таке стійкість: 1. роботоздатність системи значна; 2. перехідні процесі в них повинні бути зіжними; 3. якість перехідних процесів повинна бути заданною; 4. система повинна бути робастною. Вірна відповідь.

**Тест 12.** Функціональна структура відображає: 1. типову функціональну структуру об'єкту керування. 2. структуру керувальних дій; 3. сукупність функцій (операцій, дій), які забезпечують досягнення заданої мети функціонування системи; 4. функціональну структуру технологічних компонентів. Вірна відповідь.

**Тест 13.** Інформаційні функції призначені для: 1. лише вимірювання робочих характеристик ОК; 2. лише вимірювання параметрів ОК; 3. вимірювання значень технологічних параметрів, збирання, сортування та розподілу даних про стан об'єкту; 4. метрологічного забезпечення робочих характеристик виробничих процесів харчових технологій. Вірна відповідь.

**Тест 14.** Функції керувальних дій це: 1. забезпечення функціонування об'єкта на основі даних, одержаних при реалізації інформаційних функцій; 2. забезпечення точності відпрацювання закону керування; 3. типові впливи для одержання параметрів якості керування; 4. функції створення керованих впливів на об'єкт з метою одержання прибутку. Вірна відповідь.

**Тест 15.** Функції програмування (вибору) режимів керування формують: 1. математичну нечітку модель управління; 2. значення сукупності технологічних змінних (технологічних режимів) за сигналами одержаними ззовні; 3. систему керування впливів на об'єкт керування; 4. сигнали для визначення режимів роботи об'єкта. Вірна відповідь.

**Тест 16.** Системи стабілізації повинні забезпечувати: 1. вихідні показники виробничої системи; 2. лише параметри контролю заданих значень 3. близькість поточного значення координат (параметрів) до їх заданого значення та оцінювання точності такого наближення; 4. точність

відпрацювання системою керування заланих значень вихідної величини. Вірна відповідь.

**Тест 17.** У системах слідку вального керування задані значення вихідних координат – випадкові величини, а саме завдання є: 1. функцією довільного виду, яка наперед відома; 2. функцією визначеного виду, яка невідома; 3. функцією, яка постійно змінюється в часі; 4. функцією вхідних і вихідних параметрів виробничого процесу. Вірна відповідь.

**Тема 18.** Системи екстремального керування забезпечують: 1. комплексний показник якості керування; 2. екстремум певних ресурсів; 3. систему корекції відхилення; 4. систему формування керувальних дій. Вірна відповідь.

**Тест 19.** Замкнені САР мають наступну ознаку: 1. високий рівень точності керування; 2. відємний зворотний зв'язок; 3. систему корекції відхилення; 4. систему формування керувальних дій. Вірна відповідь.

**Тест 20.** Урозімкнених АСР не має: 1. задавальних пристроїв; 2. зворотного зв'язку; 3. автоматичних регуляторів; 4. виконавчих механізмів. Вірна відповідь.

**Тест 21.** За принципом керування АСР можуть бути системами: 1. стабілізувальними, програмними чи слідкувальними; 2. лише зі зворотним зв'язком; 3. алгоритмічними; 4. комп'ютерними. Вірна відповідь.

**Тест 22.** За кількістю регульованих величин можна виокремити АСР: 1. одновимірні АСР; 2. багатовимірні з одним вихідним сигналом; 3. з відповідно однією чи багатьма вихідними (регульовальними) величинами; 4. багатofакторними системами автоматичного регулювання. Вірна відповідь.

**Тест 23.** Інваріантні системи це ті: 1. які не чутливі (інваріантні) до збурень; 2. системи чутливі до збурень; 3. високоточні комп'ютерні системи; 4. системи з компенсаторами. Вірна відповідь.

**Тест 24.** Схема автоматизації це: 1. функціональна схема, на якій зображено складові елементи АСКТП; 2. функціональна схема автоматизованої системи керування технологічним процесом; 3. функціональна схема зв'язків складових елементів АСКТП; 4. функціональна схема з функцією систем автоматизації виробництва продуктів харчування. Вірна відповідь.

**Тест 25.** Схема автоматизації це: 1. основний технічний документ, який визначає функціонально-блочну структуру вузлів АК; 2. схема з технічними засобами керування і контролю; 3. схема розташування систем автоматики; 4. схема контурів контролю та регулювання. Вірна відповідь.

**Тест 26.** За результатами розробки схем автоматизації здійснюються: 1. монтаж виконавчих систем регулювання; 2. вибір основних технічних засобів автоматизації для об'єкта, що автоматизується; 3. визначення приводів виконавчих механізмів регуляторів; 4. вибір методів вимірювання технологічних параметрів. Вірна відповідь.

**Тест 27.** Схему автоматизації виконують у вигляді: 1. креслення, на якому

схематично умовними зображеннями показують засоби автоматизації;  
2. функціональних зв'язків між технологічним устаткуванням;  
3. функціональних зв'язків систем керування; 4. зв'язків між окремими функціональними блоками й елементами автоматики. Вірна відповідь.

**Тест 28.** Умовні зображення слід виконувати лініями такої товщини:  
1. технологічного устаткування у вигляді прямокутників довільних розмірів 0,5,...1мм.; 2. технологічного устаткування з відображенням характерних ознак устаткування – 0,2,...,0,5мм.; 3. умовні зображення засобів автоматизації у вигляді кіл – 0,5...,0,6мм.; 4. усі відповіді вірні. Вірна відповідь.

**Тест 29.** Стандартом встановлено два способи виконання схем автоматизації:  
1. розгорнутий та спрощений; 2. розгорнутий та комбінований; 3. лише дві комбінації; 4. з місцем розташування технічних засобів автоматизації. Вірна відповідь.

**Тест 30.** Для полегшення розуміння суті автоматизованого об'єкта вказують:  
1. граничні допустимі робочі значення вимірюваних чи регульованих технологічних параметрів у міжнародній системі одиниць; 2. допустимі робочі значення параметрів контролю і регулювання; 3. значення параметрів, які наводять під позиційним позначенням приладів чи поблизу позначень; 4. шкали приладів та уставки завдань регуляторів. Вірна відповідь.

**Тест 31.** Основні позначення вимірюваної величини: 1. D- густина, E-електрична величина, F- витрати; 2. D- щільність, E- питомі витрати, F-переміщення; 3. D- рівень, E- напруга, F- сила; 4. D-маса, F- в'язкість, E-ампери. Вірна відповідь.

**Тест 32.** Позначенням магнітного пускача є: 1 NS- магнітний пускач; 2. NS- магнітний пускач; 3. GS- магнітний пускач; 4. DS- магнітний пускач. Вірна відповідь.

**Тест 33.** Позначення DI означає показу вальний прилад для вимірювання:  
1. струму; 2. густини; 3. тиску; 4. кислотності. Вірна відповідь.

**Тест 34.** Позначення PDI означає прилад для вимірювання: 1. перепаду тиску; 2. перепад напруги; 3. пневматичний сигнал; 4. тиску. Вірна відповідь.

**Тест 35.** Функціональні ознаки приладів використовують для: 1. Позначення E-чутливого елемента; 2. позначення E-станції керування; 3. Позначення E-обчислювальної функції; 4. E-вхідного сигналу. Вірна відповідь.

**Тест 36.** Дискретний сигнал позначають літерою: 1.P; 2.Д; 3.С; 4.С. Вірна відповідь.

**Тест 37.** Прилади з функцією сигналізації позначають літерою: 1.Б; 2.А. 3.С; 4.G. Вірна відповідь.

**Тест 38.** Вид перетворення позначають: 1. дріб E/P; 2. сумою E+P. 3. добутком EP; 4. аналоговими сигналами. Вірна відповідь.

**Тест 39.** Яку літеру проєктанти рекомендують для позначення перетворювачів сигналів та обчислювальних пристроїв; 1.G; 2.X; 3.Y; 4. Z. Вірна відповідь.

**Тест 40.** Яку літеру використовують для позначення функції «сигналізація»?:  
1.С.; 2.Н. 3.А.; 4.В. Вірна відповідь.

**Тест 41.** Яку літеру застосовують для позначення контактної пристрою:  
1.С; 2.S.; 3.А.; 4.В. Вірна відповідь.

**Тест 42.** Типові позначення приладів та інших ТЗ автоматики, а саме термопару, термометр опору, балон монOMETричного термометра позначають:  
1.ТЕ; 2.TIR; 3.TRC; 4.PDT. Вірна відповідь.

**Тест 43.** Галузь науки, яка вивчає вимірювання, їхні методи та засоби, забезпечує їх єдність і точність, називається: 1. автоматикою; 2. системою контролю; 3. метрологією; 4. системотехнікою. Вірна відповідь.

**Тест 44.** Вимірювання виконують за допомогою: 1. засобів вимірювальної техніки; 2. засобів контролю; 3. засобів телемеханіки; 4. технічних засобів. Вірна відповідь.

**Тест 45.** Засоби вимірювання: 1. технічні засоби, які використовуються для здійснення вимірювання; 2. засоби контролю і вимірювання технологічних величин; 3. засоби, що дозволяють контролювати будь-які параметри; 4. засоби лише контролю. Вірна відповідь.

**Тест 46.** Принцип вимірювання: 1. певне фізичне явище або їх сукупність; 2. лише певне фізичне явище, яке можна контролювати; 3. вимірювання і його здійснення; 4. контроль деяких параметрів. Вірна відповідь.

**Тест 47.** Диференціальний (різницевий) метод передбачає: 1. вимірювання за допомогою диференціальних приладів; 2. вимірювання різниці між вимірюваною величиною та величиною, відтвореною мірою; 3. вимірювання за допомогою операції віднімання; 4. за допомогою операції зрівноважування. Вірна відповідь.

**Тест 48.** Нульовий метод є розвитком: 1. компенсаційного методу; 2. диференціального методу; 3. методу порівнянь; 4. безпосереднього оцінювання Вірна відповідь.

**Тест 49.** Метод заміщення ґрунтується на: 1 компенсації величини параметра; 2. методиці заміщення параметрів; 3. порівнянні з мірою; 4. метод зважування. Вірна відповідь.

**Тест 50.** Компенсаційний метод вимірювання полягає: 1. у зрівноважуванні у вимірювальному засобі вимірюваної величини; 2. в оцінці різниці двох величин; 3. у використанні еталонної величини; 4. у використанні відомої величини. Вірна відповідь.

**Тест 51.** Діапазон показань засобів вимірювань: 1. інтервал значень; 2. інтервал значень вимірюваної величини; 3. початковий діапазон; 4. початкові значення. Вірна відповідь.

**Тест 52.** Засобами вимірювальної техніки (ЗВТ) є: 1. технічні засоби, які застосовуються під час вимірювання; 2. засоби вимірювань різних параметрів; 3. засоби автоматичного контролю; 4. засоби, що вимірюють технологічні

змінні. Вірна відповідь.

**Тест 53.** Вимірювальний перетворювач реалізує: 1. вимірювання змінної величини; 2. вимірювальне перетворення фізичної величини; 3. контроль різних технологічних величин; 4. трансформацію величини в електричний сигнал. Вірна відповідь.

**Тест 54.** Компаратор реалізує: 1. порівняння однорідних фізичних величин; 2. порівняння двох величин; 3. пристрій аналізу величин; 4. перетворювач сигналів. Вірна відповідь.

**Тест 55.** Вимірювальний канал: 1. канал інформації про фізичну величину; 2. засоби зв'язку; 3. сукупність ЗВТ, які призначені для створення сигналу вимірювальної інформації про фізичну величину; 4. сукупність вимірювальних каналів для створення сигналів вимірювальної інформації про фізичні величини. Вірна відповідь.

**Тест 56.** Вимірювальна установка це: 1. сукупність вимірювальних приладів; 2. сукупність перетворювачів і допоміжних приладів; 3. сукупність вимірювальних приладів і пристроїв, які надають ОПР інформацію в доступній для сприйняття формі; 4. установка для визначення якості продукції. Вірна відповідь.

**Тест 57.** Вимірювальний прилад утворює: 1. візуальний сигнал вимірювальної інформації; 2. віртуальний сигнал інформації; 3. дискретний сигнал корисної інформації; 4. засіб вимірювання інформації. Вірна відповідь.

**Тест 58.** Вимірювальна система: 1. сукупність засобів контролю і вимірювальних приладів; 2. лише вимірювальних приладів і перетворювачів; 3. каналів передачі інформації; 4. для формування сигналів вимірювальної інформації з метою використання її в системах автоматики. Вірна відповідь.

**Тест 59.** Принцип дії диференціально-трансформаторної системи передачі сигналів полягає: 1. в компенсації сигналів різної форми; 2. в компенсації різниці трансформованих напруг у котушках передавального перетворювача та вторинного приладу; 3. в компенсації напруги двох елементів системи контролю параметрів; 4. в компенсації різниці сигналів двох сенсорів. Вірна відповідь.

**Тест 60.** Безвідмовність це: 1. властивість ЗВТ неперервно зберігати роботу здатний стан протягом деякого часу; 2. властивість засобів контролю працювати заданий час; 3. властивість надійно передавати інформацію; 4. довговічність інформаційної системи забезпечення. Вірна відповідь.

**Тест 61.** Принцип дії тензометричних перетворювачів ґрунтується: 1. на зміні їх активного опору за пружних деформацій; 2. залежності опору від довжини та перерізу тензоперетворювача; 3. на властивості провідників; 4. на властивості змінювати опір провідника. Вірна відповідь.

**Тест 62.** Напівпровідникові (п'єзорезистивні) тензорезистори залежно від способу виготовлення бувають: 1. лише вирізані; 2. лише дифузійні; 3. вирізані та дифузійні; з дифузійними перетворювачами. Вірна відповідь.

**Тест 63.** Тензорезистори мають вигляд вирізаної з монокристала силіцію: 1. платівки завтовшки 5... 10 мм; 2. платівки розміром 5x10мм; 3. платівки з провідниками; 4. платівки з германію. Вірна відповідь.

**Тест 64.** Дифузійні тензорезистори отримують: 1. дифузію певних домішок у силіцієву підкладку; 2. із напівпровідних матеріалів з п-типу; 3. провідність р-типу; 4. провідність лише п-типу. Вірна відповідь.

**Тест 65.** У п'єзоелектричному перетворювачі використовується ефект: 1. появи кристалів з електричним зарядом; 2. появи на гранях деяких кристалів у разі їх механічного деформування електричних зарядів; 3. швидкоплинних процесів зміни тиску; 4. температурної чутливості. Вірна відповідь.

**Тест 66.** Частотні електричні перетворювачі призначені для перетворення статичних величин на 1. частотні вихідні сигнали; 2. напругу; 3. кодо-імпульсні сигнали; 4. вихрові струми. Вірна відповідь.

**Тест 67.** Струмовихровий індукційний перетворювач працює за принципом: 1. детектування вихрових (індукційних) струмів; 2. контроль напруги ЕРС; 3. детектування сигналів; 4. зміни температури поверхні сталі. Вірна відповідь.

**Тест 68.** Принцип дії ридинних скляних термометрів ґрунтується на тепловому розширенню об'єму термометричної рідини, розташованої в скляному резервуарі: 1. під впливом напруги; 2. під впливом тиску; 3. під впливом електромагнітного поля; 4. під впливом температури. Вірна відповідь.

**Тест 69.** Тахометричні витратоміри – найточніші засоби для вимірювання 1. напруги; 2. витрати; 3. швидкості; 4. струму. Вірна відповідь.

**Тест 70.** Автоматика – це наука що вивчає: 1. принципи побудови систем керування виробничими процесами без прямої участі людини; 2. комплекс технічних засобів без участі особи що приймає рішення (ОПР); 3. технічні засоби, які управляють процесами виробництва продукції; 4. автоматизовані системи управління технологічними процесами. Вірна відповідь.

**Тест 71.** Система керування складається з: 1. пристроїв автоматики; 2. об'єкта керування (ОК) та управлінського пристрою; 3. лише з управлінського пристрою; 4. лише об'єкта керування і людини оператора. Вірна відповідь

**Тест 72.** Термопарі розширення можуть бути двох видів: 1. ридинно-скляні та механічні; 2. механічні та електричні; 3. індуктивні з управлінським пристроєм; 4. механічні та ридинно-ємнісні. Вірна відповідь.

**Тест 73.** Чутливим елементом біметалевого термометра є: 1. геркон; 2. пружина; 3. внутрішня пружина; 4. пластина з різним коефіцієнтом лінійного розширення. Вірна відповідь.

**Тест 74.** У поплавковому рівнемірі переміщення поплавка на поверхні рідини передається на: 1. сигналізатор; 2. показувальний пристрій; 3. прилад тиску; 4. прилад потужності. Вірна відповідь.

**Тест 75.** У гідростатичних рівнемірах вимірювання рівня рідини базується на вимірюванні: 1. струму; 2. напруги; 3. тиску; 4. потужності. Вірна відповідь.

**Тест 76.** В електричних рівнемірах зміна рівня перетворюється на пропорційний: 1. сигнал струму; 2. електричний сигнал; 3. сигнал напруги; 4. сигнал потужності. Вірна відповідь.

**Тест 77.** Чутливість об'єкта дає змогу оцінити зміни режимів роботи об'єктів під впливом: 1. реакції об'єкту; 2. спостережень; 3. керувань і збурень; 4. властивості об'єкта. Вірна відповідь.

**Тест 78.** Основним збуренням постає зміна навантаження ТОК, під яким розуміють кількість теплоти чи речовини, що проходять через ТОК за: 1. час; 2. хвилину; 3. одиницю часу; 4. за добу. Вірна відповідь.

**Тест 79.** Математичну залежність вихідної величини ТОК від однієї (за принципом суперпозиції) з вхідних чи її графічне зображення називають: 1. математичною моделлю ТОК; 2. робочою характеристикою; 3. технологічним об'єктом керування (ТОК); 4. динамікою об'єкта керування. Вірна відповідь.

**Тест 80.** Спостережуваність об'єкту передбачає можливість визначення його стану за даними: 1. вимірювань; 2. вимірювань на скінченному інтервалі часу; 3. обчислень характеристик об'єкту керування; 4. математичної моделі об'єкту. Вірна відповідь.

**Тест 81.** До нестационарних об'єктів належать такі, що змінюють свої характеристики: 1. за період експлуатації; 2. в часі за період експлуатації; 3. за період квазістационарності; 4. за період дослідження моделей. Вірна відповідь.

**Тест 82.** Керованість об'єкта означає: 1. існує сигнал, за допомогою якого об'єкт з початкового стану був переведений в усталений кінцевий; 2. що для здійснення керування потрібна інформація про всі стани об'єкту; 3. математичну умову керованості об'єкту управління; 4. що матриця керованості має ранг, який дорівнює кількості параметрів стану об'єкту. Вірна відповідь.

**Тест 83.** Самовирівнювання в об'єкті характеризує: 1. стійкість об'єкта до збурення; 2. стійкість об'єкта чи здатність самостійно переходити в усталений стан; 3. стійкість до зміни закону керування; 4. здатність відновлювати свій матеріальний чи енергетичний баланс. Вірна відповідь.

**Тест 84.** Ємність об'єкту: 1. здатність акумулювати речовину або енергію в процесі керування ним чи в процесі його функціонування; 2. здатність накопичувати енергію і видавати; 3. здатність працювати в умовах великих збурень; 4. здатність акумулювати лише енергію об'єкту в процесі керування ним. Вірна відповідь.

**Тест 85.** Запізнення в об'єктах проявляється: 1. за рахунок інерційності об'єкту управління; 2. коли вихідна величина починає змінюватись не відразу після прикладення збурення, а через деякий проміжок часу; 3. подібно до інерційності; 4. тому, що речовина або енергія розповсюджуються з деякою швидкістю. Вірна відповідь.

**Тест 86.** Транспортним залізненням називають: 1. час від моменту вчинення збурення до початку зміни керованого параметра; 2. час від моменту збурення; 3. час, за який потік речовини долає відстань; 4. час, за який вимірюється значення керованого параметра. Вірна відповідь.

**Тест 87.** Найвідомішими показниками інерційності об'єктів із позитивним самовирівнюванням вважають: 1. час інерції об'єкту; 2. стану Тоб.; 3. характеристики об'єкту досліджень; 4. коефіцієнти динаміки об'єкту. Вірна відповідь.

**Тест 88.** Детерміновані методи отримання динамічних моделей ґрунтуються на передумові: 1. існування робочих характеристик об'єкту керування; 2. існування закономірного зв'язку між вихідними та вхідними параметрами в об'єкті моделювання; 3. існування частотних характеристик; 4. існування детермінізму системи. Вірна відповідь.

**Тест 89.** Статистичні методи отримання динамічних характеристик ґрунтуються на передумові: 1. наявності рівнянь динаміки об'єкту досліджень; 2. наявності випадкових взаємодій входів і виходів в об'єкті моделювання; 3. зашумлення входів та виходів об'єктів моделювання; 4. методів статистичної статистики. Вірна відповідь.

**Тест 90.** Встановлюють значення коефіцієнтів у рівняннях об'єкту на основі: 1. ідентифікації; 2. статистики; 3. лінеризації; 4. апроксимації. Вірна відповідь.

**Тест 91.** Технологічні об'єкти керування першого порядку можуть бути: 1. нейтральними чи стійкими; 2. лише стійкими; 3. інерційними; 4. астатичними. Вірна відповідь.

**Тест 92.** Для аналітичного моделювання динаміки об'єктів керування потрібно визначати межі цього об'єкту, його входи та виходи, а також внутрішні: 1. структуру та взаємозв'язки в об'єкті; 2. лише структуру об'єкту; 3. характеристики об'єкту керування; 4. рівняння динаміки. Вірна відповідь.

**Тест 93.** Типові елементарні ланки в складі АСК можуть бути з'єднані наступним часом: 1. лише паралельно; 2. послідовно; 3. послідовно, паралельно, або зі зворотним зв'язком (зустрічно-паралельно); 4. лише зустрічно-паралельно. Вірна відповідь.

**Тест 94.** Інтегровальна ланка має вихідну величину в будь-який момент часу: 1. пропорційну інтегралу вхідної величини; 2. пропорційну диференціальній вхідній величині; 3. пропорційну похідній від шляху; 4. пропорційну прискоренню. Вірна відповідь.

**Тест 95.** Безінерційна (підсилювальна) ланка має вихідну величину, пропорційну в будь-який момент часу: 1. швидкості; 2. прискоренню; 3. вхідній величині; 4. інтегралу швидкості. Вірна відповідь.

**Тест 96.** Ідеальна диференціальна ланка має вихідну величину, пропорційну похідній за: 1. часом; 2. часом від вихідної величини; 3. часом від вхідної величини; 4. швидкістю вхідної величини. Вірна відповідь.



**Тест 97.** Аперіодична ланка 1-го порядку може бути описана операторним рівнянням виду: 1.  $(T_{p+1})(T_{p+1}) = KX(p)$ ; 2.  $(T_{p+1})y(p) = Kx(p)$ ; 3.  $T_{p-1} = K(p)$ ; 4.  $T(p) + 1 = K(xp)$ . Вірна відповідь.

**Тест 98.** Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) - це: 1. залежність співвідношення амплітуд вихідного і вхідного коливань від частоти. 2. залежність амплітуди від напруги; 3. залежність амплітуди від частоти; 4. Фазо-частотна характеристика ланки. Вірна відповідь.

**Тест 99.** Основою переходу від диференціальних до операторних рівнянь є: 1. перетворення функції; 2. інтегральне перетворення Лапласа; 3. інтегральне перетворення Дірака; 4. інтегральне перетворення Ляпунова. Вірна відповідь.

**Тест 100.** У прямому перетворенню Лапласа  $f(t)$  називають оригіналом, а отриману в результаті перетворення функцію  $F(p)$ : 1. ідентифікатором; 2. оператором; 3. її зображенням; 4. функцією. Вірна відповідь.

**Тест 101.** Поширеною в автоматизації технологічних процесів є передавальна функція: 1. це є відношення двох величин виходу до входу; 2. це є відношення зображення вихідної величини  $Y(p)$  до зображення вхідної величини  $X(p)$ ; 3. відношення оператора дії  $R(p)$  до власного оператора  $Q(p)$ ; 4. відношення сигналів вхідних до вихідних. Вірні відповіді.

**Тест 102.** Фізичний зміст поняття передавальної функції: 1. показати як вхідний сигнал трансформується в часі; 2. передається з входу на вихід у динамічному режимі; 3. перетворення сигналів; 4. поведінка сигналів в часі на вході системи. Вірна відповідь.

**Тест 103.** Лінійні системи задовольняють наступним властивостям: 1. лише суперпозиції; 2. лише гомогенності; 3. суперпозиції та гомогенності; 4. фактору масштабування. Вірна відповідь.

**Тест 104.** Можливість лінеаризації фізичних систем представляє в розпорядження дослідникам математичний апарат: 1 Ляпунова; 2. Смірнова; 3. Вишнеградського; 4. Лапласа. Вірна відповідь.

**Тест 105.** Зворотне перетворення Лапласа знаходять шляхом розложення  $\Phi(p)$  на прості дроби за допомогою: 1. правила Лапласа; 2. правила Вишнеградського; 3. правила Хевісайда; 4. правила Глушкова. Вірна відповідь.

**Тест 106.** Зворотні зв'язки (ЗЗ) в автоматичних системах керування можуть бути: 1. лише позитивними; 2. лише від'ємними; 3. жорсткими ЗЗ, жорсткими від'ємними ЗЗ; 4. гнучкими від'ємними ЗЗ. Вірні відповіді.

**Тест 107.** Автоматичний регулятор – це керувальний пристрій, який слугує для: 1. вироблення на основі появи неузгодження керувального сигналу на технологічний об'єкт; 2. створення системою керування керувального сигналу; 3. підтримування значення технологічного параметра на заданому рівні; 4. підтримання регулятором вихідного сигналу пропорційно заданому. Вірна відповідь.

**Тест 108.** У характеристичному рівнянні системи корені визначають:

1. стійкість системи; 2. динамічні зміни в системі; 3. характер руху системи; 4. вільних рух системи. Вірна відповідь.

**Тест 109.** Розташування полюсів і нулів на комплексній  $p$ -площині визначає характер: 1. власного (вільного) руху системи; 2. динаміки руху системи; 3. якості системи; 4. стійкості системи. Вірна відповідь 1.

**Тест 110.** Передавальна функція існує лише: 1. для нелінійних систем; 2. для нестационарних систем; 3 для лінійних стаціонарних (з постійними параметрами) систем; 4. для інваріантних систем. Вірна відповідь.

**Тест 111.** Стан системи – це сукупність таких змінних, знання яких вкупі з її вхідними функціями і рівняннями, які описують динаміку системи, дозволяють: 1. визначити її стійкість ; 2. її стаціонарність; 3. не лінійність; 4. визначити її майбутній стан і вихідну змінну. Вірна відповідь.

**Тест 112.** Чутливість системи до зміни навколишнього середовища, відсутності точної інформації про сировину, старіння є питанням значної важливості. У цьому випадку використовують зворотні зв'язки, які: 1 знижують чутливість системи до зміни параметрів; 2.враховують фактори, що змінюють вихід; 3. зменшують коефіцієнт підсилення; 4. збільшують коефіцієнт підсилення. Вірна відповідь.

**Тест 113.** Усталений режим – це: 1. реакція системи, яка залишається після великого проміжку часу з моменту прикладення вхідного сигналу; 2. реакція системи на тестові сигнали; 3. реакція системи на збурення зовнішнього середовища; 4. оцінка якості системи в процесі оцінки збурень. Вірна відповідь.

**Тест 114.** Система вважається **оптимальною системою керування**, якщо її параметри обирають таким чином, що оцінка якості приймає: 1. екстремальне (мінімальне) значення; 2. раціональне значення; 3. задане значення; 4. максимальне значення. Вірна відповідь.

**Тест 115.** Оцінка якості – це чисельний показник якості системи, яку вибирають таким чином щоб інтеграл від квадрата помилки був: 1. максимальним; 2. рівним нулю; 3. мінімальним; 4. невизначеним. Вірна відповідь.

**Тест 116.** Стійкість системи пов'язують з характером розміщення коренів характеристичного рівняння на комплексній площині. Тоді система є стійкою коли: 1. корені розташовані ліворуч від уявної осі; 2. комплексно-спряжені корені знаходяться на уявній осі; 3. корені розташовані праворуч і ліворуч від уявної осі; 4. корені розташовані лише праворуч від уявної осі. Вірна відповідь.

**Тест 117.** Аперіодична межа стійкості відповідає: 1. розміщенню одного дійсного кореня на уявній осі; 2. розміщенню кореня праворуч від уявної осі; 3. розміщенню дійсних коренів далеко від уявної осі; 4. розміщенню комплексно-спряжених коренів праворуч від уявної осі. Вірна відповідь.

**Тест 118.** Коливальна межа відповідає наступному положенню коренів; 1. праворуч від уявної осі; 2. парі суто уявних коренів; 3. парі суто дійсним кореням; 4.одному дійсному біля уявної осі. Вірна відповідь.

**Тест 119.** Алгебраїчний критерій стійкості Гурвіца передбачає дослідження: 1. положення корення на комплексній площині; 2. характеристичного полінома системи керування; 3. визначника Гурвіца; 4. стійкості системи керування. Вірна відповідь.

**Тест 120.** Якість процесів регулювання можна поліпшити застосуванням систем не чутливих до деяких збурень. Такі системи будемо називати: 1. експертними; 2. інваріантними; 3. астатичними; 4. адаптивними. Вірна відповідь.

**Тест 121.** У багатьох системах керування процесами виробництва харчів є запізнення в часі. Критерій Найквіста має ті переваги, що він дозволяє врахувати: 1. екстремальні чинники; 2. вплив цього запізнення на стійкість системи; 3. нелінійні фактори; 4. експертні фактори. Вірна відповідь

**Тест 122.** ПІД-регулятор має наступні канали: 1. пропорційний, інтегральний і диференційний; 2. лише інтегральний; 3. пропорційно-інтегральний; 4. пропорційно-диференційний. Вірна відповідь.

**Тест 123.** Адаптивною системою називають ту, яка дозволяє: 1. автоматично визначати потрібні закони керування за рахунок аналізу поведінки об'єкта в процесі його ідентифікації; 2. використати комп'ютерну програму корегування коефіцієнтів у часі; 3. розробити метод корекції коефіцієнтів ПІД регулятора; 4. вбудувати в ПІД регулятор алгоритми ідентифікації та розпізнавання і корекції стану об'єкта в часі. Вірна відповідь.

**Тест 124.** Робасне керування в АСУТП виробництва продуктів харчування презентоване чинниками: 1. сукупністю методів теорії керування; 2. алгоритмами керування невизначенністю; 3. метою, яких синтез такого регулятора, який забезпечує би найвищу якість керування; 4. які виконують пошук закону керування з неповними моделями. Вірна відповідь.

**Тест 125.** Система нечіткого виведення (fuzzy inference system) – це: 1. локальна високоефективна система керування технологічним процесом; 2. система логічного виведення, яка базується на алгоритмі отримання нечітких висновків; 3. алгоритм дії з використанням понять нечіткої логіки; 4. алгоритм керування з концепціями теорії нечітких множин. Вірна відповідь.

**Тест 126.** Процес нечіткого виведення поєднує наступні концепції: 1. знання експертів про керування технологічним процесом; 2. базу знань на на основі нечіткого аналізу об'єкту керування; 3. теорії нечітких множин, функції належності, лінгвістичні змінні; 4. нечіткі логічні операції, методи нечіткої імплікації і нечітку композицію. Вірна відповідь.

**Тест 127.** Системи нечіткого виведення в АСУТП виробництва продуктів харчування можуть вирішувати наступні завдання: 1. автоматичного керування та класифікації даних; 2. розпізнавання образів і прийняття рішень; 3. машинного навчання; 4. алгоритмізації технологічних процесів. Вірна відповідь.

**Тест 128.** Програмне забезпечення в АСУТП приймає участь в керуванні

процесом виробництва за допомогою: 1. машинного інтерфейсу; 2. інтерфейсу користувача; 3. інтерфейса оператора; 4. інформаційної бази прецедентів. Вірна відповідь.

**Тест 129.** Система автоматичного керування – це сукупність: 1. лише інформаційного забезпечення та бази знань; 2. пристроїв, алгоритмів, бази даних, бази знань, бази прецедентів, математичного забезпечення; 3. атрибутів, які забезпечують керування об'єктом без участі людини; 4. інтерфейсів та алгоритмів прийняття рішень. Вірна відповідь.

**Тест 130.** Під інтелектуальною системою управління підприємством будемо розуміти: 1. об'єднану інформаційним процесом сукупність технічних засобів і програмного забезпечення; 2. пристрої прийняття рішень, які працюють з ОПР і надають йому рекомендації; 3. колективне прийняття рішень. щодо керування бізнесом і виробництвом продукції; 4. системи експертного оцінювання якості продукції. Вірна відповідь.

**Тест 131.** Невизначеність об'єкта віддзеркалює: 1 неточність моделі керування; 2. неточність алгоритмів керування; 3. неточність бази знань; 4. неточність давальників. Вірна відповідь.

**Тест 132.** Динамічна експертна система є деяке комплексне утворення, яке може оцінювати становище системи і навколишнього середовища, співставляти параметри бажаного і реального стану, а головне: 1. приймати рішення і виробляти управління, які спонукають до досягнення цілей; 2. лише приймати рішення; 3. лише надавати ОПР рекомендації щодо оптимізації бізнес-процесів; 4. передавати інформацію на верхній рівень АСУТП. Вірна відповідь.

**Тест 133.** Основна особливість адаптивних систем управління підприємством – це: 1. можливість одержання інформації у процесі функціонування і використання її для управління; 2 використання інформації про зовнішнє середовище; 3. використання інформаційних підсистем керування; 4. використовувати для керування інтелектуальні блоки. Вірна відповідь.

**Тест 134.** Принципова різниця адаптивного управління від рабастного полягає: 1. в системі алгоритмів оптимізації; 2. використанні апріорної інформації про об'єкт. 3. використання апріорної інформації про невизначеність в системі; 4. у блоці адаптації. Вірна відповідь.

**Тест 135.** У процесі проектування комбінованих систем основним питанням є: 1. вибір того чи іншого типу керування; 2. вибору типу керування на основі штучного інтелекту; 3. оцінка знань об'єкта; 4. вибір бази даних і знань. Вірна відповідь.

**Тест 136.** Нейронною мережею (НМ) називають динамічну систему, яка складена із: 1. вузлів направлено графа елементарних процесорів; 2. формальних нейронів, які генерують вихідну інформацію у відповідь на вхідний вплив; 3. операційних частин нейронних ЕОМ; 4. біологічних об'єктів. Вірна відповідь

**Тест 137.** Вид функції активації в багатьох випадках визначають:

1. обчислювальні можливості нейронної мережі; 2. інформаційні можливості нейронної мережі; 3. різновиди топології нейронної мережі; 4. паралельне оброблення інформації. Вірна відповідь.

**Тест 138.** Навчання мережі – це: 1. ітераційна процедура; 2. коли на кожній ітерації проходить зменшення помилки  $E$  до заданого значення; 3. синтез функції, яка оптимальна відносно помилки  $E$ ; 4. нескінченний процес зменшення помилки  $E$ . Вірна відповідь.

**Тест 139.** Алгоритм навчання мережі Хопфілда побудовано на основі: 1. правила Хебба; 2. методу навчання з вчителем; 3. процедури Больцмана; 4. правила навчання вагових коефіцієнтів. Вірна відповідь.

**Тест 140.** Для навчання нейронної мережі необхідно мати: 1. експерта; 2. базу даних; 3. навчальну вибірку; 4. вчителя. Вірна відповідь.

**Тест 141.** Оцінка якості роботи нейронної мережі базується на значенні параметра: 1. MSE – середньо-квадратичній помилки; 2. відхилення від заданої величини; 3. модифікації; 4. інтерполяції. Вірна відповідь.

**Тест 142.** Управління з прогнозом – це спосіб керування об'єктом в якому: 1. інформація про динаміку об'єкту визначає його майбутню поведінку; 2. інформація про динаміку об'єкта визначається експертом; 3. інформація про динаміку об'єкта визначається комп'ютером; 4. інформація про динаміку об'єкту визначається інтелектуальною системою. Вірна відповідь.

**Тест 143.** Блок фазифікації виконує функцію перетворення чітких значень вхідних змінних в: 1. дискретні; 2. нечіткі; 3. експертні; 4. предикати. Вірна відповідь.

**Тест 144.** Основна ідея, яка використовується в СНЛ, полягає у введенні «досвіда експерта», чи ОПР у розробку системи яка може: 1. керувати деяким динамічним процесом; 2. керувати нелінійним процесом; 3. керувати стохастичним процесом; 4. керувати невизначенністю. Вірна відповідь.

**Тест 145.** Процедура перетворення значень базової змінної в нечітку (лінгвістичну) змінну, яку називають функцією належності, називається: 1. фазифікацією; 2. програмуванням; 3. дефазифікацією; 4. нечіткою логікою. Вірна відповідь.

**Тест 146.** Інтелектуальні системи працюють не з реальними об'єктами, а їх формальним уявленням, яке заложено у вигляді: 1. бази знань, 2. моделей. правил і фактів; 3. бази прецедентів; 4. бази даних. Вірна відповідь.

**Тест 147.** Фрейм – це структура даних, яка призначена для: 1. представлення стандартної ситуації; 2. експертної оцінки; 3. нечіткої ситуації; 4. нечітких зв'язків. Вірна відповідь.

**Тест 148.** Предикат – логічна функція, областю визначення якої є: 1. множина значень деяких сутностей – сортів, а область значень належить множині (істина, брехня); 2. множина значень технологічних ситуацій; 3. множина значень аварій та аварійних ситуацій; 4. множина моделей. Вірна відповідь.

**Тест 149.** Протофрейм- абстрактна ієрархічна структура даних, де визначено: 1. область прийняття рішень оператором; 2. жорстку систему слотів (імен ознак для опису об'єктів) та закріплення їх зв'язків; 3. область розпізнавання технологічних ситуацій; 4. частину інформаційного поля. Вірна відповідь.

**Тест 150.** Мережеві моделі або семантичні мережі (СМ) представляють собою орієнтований граф вершини якого поняття, а дуги: 1. Знаки; 2. відношення між ними; 3. залежності; 4. взаємозв'язки. Вірна відповідь.

**Тест 151.** Для інтелектуальних систем можливо виділити наступні класи прикладних задач: 1. лише моделювання ситуацій ; 2. лише прийняття рішень; 3. розпізнавання і класифікації ситуацій; 4. моніторингу, контролю, діагностики, прийняття рішень і керування. Вірна відповідь.

**Тест 152.** Нейрон має тіло (сому), дерево входів-дендритів, а також: 1. вихідний сигнал; 2. вихідний нейрон; 3. вихід-аксон; 4. рецептор. Вірна відповідь.

**Тест 153.** MES-системи підтримують виробничу діяльність підприємства в режимі: прийняття рішень ОПР; 2. реального часу; 3. робочих операцій; 4. оптимізації виробництва. Вірна відповідь.

**Тест 154.** Контур керування АСУТП рівня MES (оперативно-виробничий) спирається на відфільтровану інформацію, яка надходить: 1 від підсистем інформаційного забезпечення; 2. від АСУТП та інших служб підприємства; 3. від датчиків і ОПР; 4. від систем ERP; Вірна відповідь.

**Тест 155.** Контур керування АСУТП рівня ERP забезпечує: 1. підтримку бізнес-процесів і задач стратегічного управління; 2. лише операцій стратегічного керування; 3. управління ресурсами; 4. управління потенціалом. Вірна відповідь.

**Тест 156.** Режим моніторингу: 1. Ситуаційний центр контролює ті чи інші процеси в конкретній сфері управління; 2. лише чинники бізнес-процесів; 3. виробничих ситуацій; 4. аварійних режимів роботи обладнання. Вірна відповідь.

**Тест 157.** Режим роботи СЦ АСУ в кризових ситуаціях: 1. збір інформації; 2. її моделювання; 3. прийняття рішень в кризових ситуаціях; 4. керування персоналом підприємства. Відповідь.

**Тест 158.** Основним елементом технічного оснащення СЦ АСУ є: 1. екран колективного користування; 2. монітор; 3. відеоконферензал; 4. відео термінали. Вірна відповідь.

**Тест 159.** Мікроархітектура процесора визначає реалізацію внутрішньої структури, а саме: 1. принципи виконання надходжених команд; 2. способи розміщення та оброблення даних; 3. способами виконання арифметичних даних; 4. процесорною шиною. Вірна відповідь.

**Тест 160.** Пристрій виведення мікропроцесорної системи перетворює вихідні дані на форму: 1. зручну для сприйняття користувачем; 2. для подальшого оброблення чи зберігання інформації; 3. цифрову за допомогою ЦАП;

4. потрібну оператору. Вірна відповідь.

**Тест 161.** Магістральна організація зв'язків між модулями системи за допомогою наступних типів шин: 1. лише керування і даних; 2. адреси, керування, даних; 3. лише керування; 4. лише адреси. Вірна відповідь.

**Тест 162.** Продуктивність мікропроцесорів з однією і тією самою архітектурою пропорційна: 1. амплітуді сигналу на виході; 2. тактовій частоті; 3. напрузі; 4. фазі сигналу. Вірна відповідь.

**Тест 163.** Архітектурою контролера називають: 1. набір його основних компонентів; 2. зв'язків між ними; 3. зв'язків між основними пристроями; 4. зв'язків між блоками введення і виведення. Вірна відповідь.

**Тест 164.** Промислові роботи (ПР) відносяться до: 1. мехатронних комплексів у виробництві продуктів харчування; 2. класу машин, які використовують для автоматизації виробництва продукції; 3. автоматизованих безлюдних систем; 4. класу інтелектуальних систем. Вірна відповідь.

**Тест 165.** Основні сфери використання промислового робота: 1. переміщення в просторі об'єктів маніпулювання; 2. переміщення в просторі різних предметів; 3. переміщення заданих предметів у просторі; 4. переміщення предметів за допомогою систем автоматики. Вірна відповідь.

**Тест 166.** Система координатних переміщень промислового робота (ПР) це: 1. система переміщення руки робота в просторі; 2. система, яка визначає кінематику основних рухів і форму робочої зони; 3. руки захвату (затиску) деталі тощо; 4. система переміщення виконавчого органа робота. Вірна відповідь 2.

**Тест 167.** Вантажопідйомність руки ПР – це: 1. найбільша маса об'єктів маніпулювання, які можуть переміщуватись рукою; 2. зусилля переміщення об'єктів маніпулювання; 3. затиск деталі та її переміщення в просторі рукою; 4. адаптивність до збільшення ваги переміщення. Вірна відповідь.

**Тест 168.** Вантажопідйомність промислового робота визначається так: 1. сумарна вантажопідйомність його рук (виконавчих механізмів); 2. сумарна вага переміщення вантажів; 3. сумарна вага захоплювального пристрою; 4. сумарна вага переміщених продуктів за день. Вірна відповідь.

**Тест 169.** Число ступенів рухомості ПР визначається: 1. сумою координатних рухів ПР відносно певних стійки; 2. сума можливих рухів виконавчих механізмів (ВМ) ПР; 3. сума координатних рухів об'єкта маніпулювання відносно опорної системи ПР; 4. сума координатних рухів об'єкта в часі. Вірна відповідь.

**Тест 170.** Похибка позиціонування: 1 сума відхилень ВМ від заданих координат; 2. відхилення заданої позиції виконавчого механізму від фактичної; 3. кутова величина виконавчого механізму; 4. відхилення виконавчого органу в часі. Вірна відповідь.

**Тест 171.** Робоча зона промислового робота: 1. простір переміщення руки ПР;

2. простір рухомих ланок маніпулятора; 3. простір, в якому може перебувати робочий орган маніпулятора; 4. простір, який необхідно контролювати роботом. Вірна відповідь.

**Тест 172.** Захоплювальні пристрої (ЗП) промислових роботів слугують: 1 для захоплення об'єктів маніпулювання; 2. для захоплення і втримання у визначеному положенні об'єктів маніпулювання; 3. лише для захоплення у визначеному положенні об'єктів маніпулювання; 4. для виконання заданих операцій. Вірна відповідь.

**Тест 173.** Адаптивні захоплювальні пристрої – це: 1. програмовані пристрої; 2. з системами розпізнавання форми, маси об'єкту; 3. системи, що оснащені давачами зовнішньої інформації; 4. системи з технічним зором. Вірна відповідь.

**Тест 174.** Робот це: 1 автоматична система; 2. багатофункціональна перепрограмована машина; 3. інтелектуальний живий організм; 4. автомат з системою технічного зору. Вірна відповідь.

**Тест 175.** Електромагнітні захоплювальні пристрої чутливі: 1. до матеріалів з високим рівнем магнітного притягування; 2. придатні лише для матеріалів, що намагнічуються; 3. лише для сталі; 4. лише для міді. Вірна відповідь.

**Тест 176.** Адаптивні ПР мають: 1. адаптивну систему керування; 2. технічний зір; 3. сенсорне забезпечення; 4. інформаційний інтерфейс. Вірна відповідь.

**Тест 177.** Інтегральні ПР здатні формувати програму своїх дій на основі: 1. програмного забезпечення; 2. неймережевих систем; 3. інформації про об'єкти; 4. системи аналізу зовнішнього середовища. Вірна відповідь.

**Тест 178.** Робототехніка це: 1. сфера науки і техніки, пов'язана зі створенням роботів; 2. сфера проектування автоматів; 3. сфера проектування і синтезу безлюдних технологій виробництва продуктів; 4. сфера мікропроцесорного керування. Вірна відповідь.

**Тест 179.** Маніпуляційний робот використовують: 1. для виконання функцій руху, аналогічним функціям руки людини; 2. для використання складних технологічних операцій; 3. для виконання безлюдних операцій виробництва продукції; 4. для виконання операцій різання. Вірна відповідь.

**Тест 180.** Мобільний робот: 1. робот для виконання складних рухів ВМ; 2. робот, який рухається в робочому середовищі у відповідності з програмою керування; 3. робот, який переміщує предмети в просторі; 4. робот, який складає готову продукцію. Вірна відповідь.

**Тест 181.** Спеціальний робот: 1. робот для виконання п-видів операцій; 2. робот для виконання однієї операції одного виду; 3. мехатронний автомат з високим рівнем розпізнавання предметів; 4. багаторівнева система керування переміщення продукції. Вірна відповідь.

**Тест 182.** Універсальний робот: 1. робот з технічним зором; 2. робот з візуалізацією та програмним забезпеченням (ПЗ); 3. робот для виконання різних операцій; 4. робот зі змінною структурою. Вірна відповідь.



**Тест 183.** Спеціалізований робот: 1. робот для виконання різних операцій заданих видів; 2. робот для виконання різних операцій одного виду; 3. робот для виконання лише запрограмованих операцій; 4. пристрій з інтелектуальною програмою. Вірна відповідь.

**Тест 184.** Роботизовані комплекси: 1. багато технологічні автоматизовані системи; 2. автоматизовано діючі перепрограмовані роботи, вбудовані в технологічний процес; 3. роботи з високим рівнем автоматизації та ПЗ; 4. сучасні автоматизовані комплекс. Вірна відповідь.

**Тест 185.** Промисловий робот: робот, призначений для виконання технологічних І/АБО допоміжних операцій; 2. робот з ПЗ для виконання технологічних операцій; 3. робот без технічного зору для виконання допоміжних операцій; 4. високоточних прецизійних рухів. Вірна відповідь.

**Тест 186.** Роботизований комплекс: 1. технологічна лінія з виробництва продукції; 2. сукупність одного або декількох промислових роботів і обладнання; 3. сукупність автоматів та обладнання; 4. сукупність інтегрованих автоматів. 4. вбудованих в технологічне обладнання ультразвукових інтенсифікаторів. Вірна відповідь.

**Тест 187.** Мехатроніка: 1. сфера науки та техніки, основана на синергетичному об'єднанню пристроїв; 2. лінії з автоматичними робочими місцями; 3. система інтелектуального керування виробництвом продукції; 4. система нових знань. Вірна відповідь.

**Тест 188.** Роботи з інтерактивним керуванням: 1. інтелектуальні роботи, які розпізнають предмети і приймають рішення; 2. діалогові системи керування технологічним процесом; 3. роботи з комбінованими системами керування; 4. роботи зі змінною структурою. Вірна відповідь.

**Текст 189.** Робочий орган (РО) робота це: 1. складова виконавчого пристрою ПР; 2. робочий орган робота, який утримує об'єкт робочого середовища; 3. один із елементів промислового робота; 4. пристрій впливу на процес. Вірна відповідь

**Тест 190.** Пристрій управління це: 1. пристрій ПР для формування і створення управлінських впливів виконавчому механізму (ВМ); 2. система команд ВМ; 3. управлінська програма для ВМ; 4. блок виконавчих механізмів. Вірна відповідь.

**Тест 191.** Основним компонентом виконавчого пристрою є: 1. виконавчий механізм – багато ланцюгова частина ПР, яка реалізує функцію руху; 2. виконавчий механізм, який виконує функцію технічного зору; 3. система двигунів та електромагнітів; 4. система датчиків контролю і сигналізації. Вірна відповідь.

**Тест 192.** Робочий простір ПР: 1. множина точок; 2. множина точок, якими може співпадати точка виконавчого пристрою (ВП) промислового робота; 3. множина точок, з якими може співпадати хоч би одна точка ВП промислового робота; 4. траєкторія руху виконавчого пристрою. Вірна

відповідь.

**Тест 193.** Механічний перетворювач це: 1 пристрій з виконавчим механізмом; 2. пристрій, який перетворює параметри руху електродвигуна в необхідні параметри руху вихідної ланки привода; 3. пристрій з системою автоматичного керування рухом руки ПР; 4. механізм прискорення. Вірна відповідь.

**Тест 194.** Індуктивні датчики переміщень в якості активного елементу використовують: 1. змінну індуктивність або взаємну індуктивність; 2. амплітуду сигналів індуктивного контура; 3. взаємодію феромагнітного контура; 4. індуктивний контур. Вірна відповідь.

**Тест 195.** Автоматична система регулювання робота складається із наступних елементів: 1. автоматичного регулятора, об'єкта керування, компенсуючого пристрою; 2. що формують процес керування на основі сигналів неузгодження; 3. які сумують сигнали неузгодження; 4. введення і виведення інформації. Вірна відповідь

**Тест 196.** Об'єкт керування або регулювання – це: 1. технологічний процес; 2. робототехнологічний комплекс; 3. технологічний процес чи агрегат, в якому відбувається перетворення речовини (сировини) в продукцію; 4. пристрій автоматики. Вірна відповідь.

**Тест 197.** Системи інтелектуального управління РТК в умовах неповної інформації зазвичай реалізуються у вигляді: 1. систем верхнього рівня; 2. комплексу програмних засобів на комп'ютері верхнього рівня керування; 3. системи інформаційного забезпечення РТК; 4. адаптивного регулятора. Вірна відповідь.

**Тест 198.** Захоплювальні пристрої роботів втримують предмет завдяки: 1 кінематичній дії робочих елементів (губок, пальців, кліщів) за допомогою сил тертя; 2. лише комбінації сил тертя і запираючих зусиль; 3. активних дій кліщів або шарнірних пальців; 4. спеціальним елементам захоплення предметів. Вірна відповідь

**Тест 199.** Адаптивне управління робота виконують: 1. у функції від параметрів зовнішнього середовища і дозволяє забезпечити досягнення цілі керування при неповній апріорній інформації про параметри; 2. виконується вбудованим автоматом зі захоплювальним пристроєм випадкових предметів; 3. виконується адаптивним регулятором зі сенсорним пристроєм маніпулятора; 4. з метою підвищення точності переміщення предметів. Вірна відповідь.

**Тест 200.** Проектування технічних систем це: 1. виконання технічного завдання командою проекту; 2. процес створення нового виробу у вигляді його проекту; 3. розробка проекту робототехнологічного комплексу та його документації; 4. розробка пристроїв автоматики командою проекту. Вірна відповідь..

**Тест 201.** Роботизовані технологічні комплекси, в яких ПР використовують: 1. в допоміжних операціях щодо обслуговування основного технологічного процесу; 2. в допоміжних та головних операціях; 3. лише в операціях керування промисловим роботом; 4. мехатронні пристрої та адаптивні системи керування.

Вірна відповідь.

**Тест 202.** Основні переваги інтелектуальних мехатронних модулів(ІММ):  
1. здатність ІММ виконувати складні операції розпізнавання предметів;  
2. здатність виконувати комунікації між центрами керування і виконавчими механізмами робота; 3. здатність ІММ виконувати складні рухи самостійно, без звернення до контролера верхнього рівня керування та їх гнучкість; 4. висока точність виконання програми. Вірна відповідь.

**Тест 203.** Робототехніка – прикладна наука, що охоплює: 1. проектування, розробку та використання роботів, а також комп'ютерних систем для їх контролю, сенсорного зворотного зв'язку і обробки інформації РТС.; 2. використання програмного забезпечення; 3 алгоритми та систем 3Д-моделювання; 4. дослідження і виготовлення роботів та маніпуляторів. Вірна відповідь.

**Тест 204.** Комп'ютерезована діагностична система передбачає застосування у своєму складі: 1. комп'ютерних засобів для отримання інформації про технічний стан об'єкта діагностики; 2. програмно-апаратні засоби контролю; 3 інформаційних систем зі здавачами, актуаторами; 4. адаптивних підсистем розпізнавання аварійних ситуацій та аварі. Вірна відповідь.

**Тест 205.** Характеристики технологічних середовищ можуть бути визначені за допомогою: 1. аналітико-експериментальних досліджень і методів комп'ютерного моделювання; 2. статистичних методів оцінки параметрів процесу; 3. нейромережових систем розпізнавання; 4. методів ідентифікації. Вірна відповідь.

**Тест 206.** Мехатронні пристрої – клас машин або вузлів, що базуються на використанні досягнень: 1. точної механіки, електроприводу, електроніки, комп'ютерного керування; 2. інтеграції функціональних елементів; 3. електромеханіки з механізмами передачі руху; 4. методів штучного інтелекту. Вірна відповідь.

**Тест 207.** Роботизація технологічних процесів виробництва продуктів харчування – це: 1. процес автоматизації технологічних процесів з максимізацією прибутку; 2. неперервний процес використання роботизованих технологій, які змінюють монотонну людську працю; 3. технології та алгоритми, які можуть імітувати складні фізичні процеси; 4. сукупність обладнання, яке оснащене автоматами та сенсорами для виробництва продукції здорового харчування. Вірна відповідь.

**Тест 208.** Кроковий електропривод виконавчого пристрою – це: 1. електродвигун змінного струму з перетворювачем; 2. електродвигуни, які повертають виконавчі ланки ВП покроково на певний кут під управлінням контролера; 3. електродвигун з системою імпульсного керування; 4. кроковий двигун з автономною системою електроспоживання. Вірна відповідь.

**Тест 209.** Датчик – це: 1. первинний перетворювач сигналу; 2. елемент вимірювального, сигнального, регулюючого або керуючого пристрою системи,

що перетворює контрольовану величину в зручний для використання сигнал; 3. пристрій для одержання інформації про зовнішнє середовище; 4. система зв'язку зі зовнішнім світом. Вірна відповідь.

**Тест 210.** Колаборативні роботи (коботи) з високим рівнем інтелекту призначені: 1. для роботи з людьми; 2. для роботи з автоматами; 3. для роботи з мережею роботів і людей; 4. лише з персоналом. Вірна відповідь.

**Тест 211.** Маніпулятори РТК виробництва продуктів харчування – це складний просторовий механізм з декількома ступенями рухомості, який створює: 1. систему, що відтворює рухи руки людини; 2. тверді і пружинні ланки, передачу та привід; 3. заданий рух робочого органа – захоплювача; 4. систему впливу сигналів на сировину. Вірна відповідь.

**Тест 212.** У робототехнологічній системі керування роботом переміщення хліба в камеру заморожування з системою технічного зору, датчиками кольору, запаху тощо є цифрова система керування, яка виконана на 32-розрядному мікропроцесорі RISC і запам'ятовувальній пристрої 16 Мб. Тоді така система стійка якщо: 1. усі полюси її передавальної функції розташовані на комплексній площині всередині одиничного кола; 2. усі полюси від'ємні; 3. усі полюси позитивні; 4. полюси змішанні. Вірна відповідь.

**Тест 213.** У виробничих операціях виробництва хлібобулочних виробів, де необхідна велика точність і швидкість можуть бути використані роботи. Система керування рухом руки такого робота в розімкненому стані може бути описана: 1. апередичною ланкою; 2. коливальною ланкою зі запізненням; 3. ланкою підсилення зі запізненням; 4. послідовно включеними двома апередичними ланками. Вірна відповідь.

**Тест 214.** Головна мнемосхема системи інтелектуального керування процесом випарювання молочних продуктів включає: 1. аларми, тренди для оцінки ОПР, аварійних систем і неузгоджень; 2. аларми для визначення ОПР тривоги; 3. мнемо-схему технологічного процесу керування випарювання з оцінкою змінних в часі; 4. лише мнемо-схему роботи інтелектуальної системи керування процесом випарювання. Вірна відповідь.

**Тест 215.** Підсистема контролю тривоги (Alarms Management) працює наступним чином: 1. в режимі реального часу значення однієї змінної перепадає в ненормований (аварійний стан) виникає сигнал оповіщення; 2. якщо виникає аварія чи аварійна ситуація, то ОПР одержує спеціальну інформацію; 3. оцінює нештатні ситуації, які називають тривогами (Alarms); 4. лише в реальному масштабі часу надає оператору інформацію про аварії. Вірна відповідь.

**Тест 216.** АСУТП холодозабезпечення включає системи автоматизації: 1. ланцюга холодильної ланки; 2. холодильних машин, конденсаторів і випарників; 3. холодопостачання холодильних камер; 4. процесів охолодження і заморожування. Вірна відповідь.

**Тест 217.** Під терміном «хмара» будемо розуміти: 1. динамічну систему взаємодії інформаційної підсистеми підприємства зі зовнішніми базами

інформації; 2. сукупність корпоративних ресурсів: ємність, розмір і потужність яких динамічно змінюються в залежності від об'єму задач, які вирішує ОПР у конкретний момент часу; 3. інформаційна система з Інтернет – ресурсами і системою передачі інформації; 4. інформаційне сховище даних зі системами зв'язку. Вірна відповідь.

**Тест 218.** Дискретні процеси – це: 1. процеси, які повторюються в часі; 2. процеси, які характеризуються періодичністю різних перетворень або чергуванням операцій перемішування і дозування; 3. процеси впливу на сировину, які необхідні для виробництва продуктів харчування; 4. технологічні процеси, які важливі для керування виробництвом продуктів здорового харчування. Вірна відповідь.

**Тест 219.** Дискретні системи – це: 1. сучасні комп'ютерні системи керування; 2. мікропроцесорні системи керування; 3. цифрові системи безпосереднього керування за допомогою ЕОМ; 4. адаптивні системи. Вірна відповідь.

**Тест 220.** Рівняння, які визначають залежність зміни вихідних координат об'єкту керування в часі у від зміни вхідних збурень  $x$  називається: 1. робочими характеристиками; 2. динамічними характеристиками; 3. статичними характеристиками; 4. динамічними характеристиками або диференціальними рівняннями. Вірна відповідь.

**Тест 221.** Основні функції АРМ оператора холодильного підприємства: 1. контроль технологічних параметрів; 2. звукова і світлова сигналізація, управління регуляторами, клапанами, дискретними ВМ; 3. контроль і управління програмно-логічними операціями протиаварійного захисту (ПАЗ); 4. за поминання передісторії параметрів у формі трендів, формування режимних листів, протоколів негараздів, блокування і захист з вказівкою причини, розрахунок інтегрованих показників якості технологічного процесу. Вірна відповідь.

**Тест 222.** Програмне забезпечення, яке одержане в результаті розробки та відстеження і призначене для рішення різних задач користувача, називають: 1. прикладним; 2. інструментальним; 3. кросовим; 4. управлінським. Вірна відповідь.

**Тест 223.** Рівняння, які визначають залежність сталих вихідних координат  $U$  об'єкта від вхідних координат  $X$ , називається: 1. статистичними характеристиками; 2. нелінійними характеристиками; 3. робочими характеристиками; 4. квазінечіткими характеристиками. Вірна відповідь.

**Тест 224.** Життєвий цикл програмного забезпечення (ПЗ) – сукупність окремих етапів робіт, що проводяться у заданому порядку протягом періоду часу, який починається з: 1. вирішення питання про розроблення ПЗ і закінчуються припиненням використання ПЗ; 2. лише вирішення початку проектних робіт щодо виконання проектних робіт; 3. наукових досліджень і етапу проектування; 4. етапу утилізації програмного забезпечення. Вірна відповідь.

**Тест 225.** Інтерфейс користувача – це: 1. засіб зручної взаємодії користувача

(ОПР) з інформаційною системою; 2. сукупність засобів оцінки інформації; 3. лише засіб взаємодії людини з системою; 4. сучасний метод одержання нових знань. Вірна відповідь.

**Тест 226.** Інформаційне забезпечення АСУ – це: 1. сукупність єдиної системи класифікації і кодування техніко-економічної інформації; 2. сукупність уніфікованих систем і масивів інформації, які використовують в АСУ; 3. сукупність інформаційного забезпечення і програмного забезпечення; 4. лише програмного забезпечення. Вірна відповідь.

**Тест 227.** Динамічна інформація верхнього рівня АСУП – це: 1. динамічна відеоінформація; 2. відео-, мульт- і слайд-фільми; 3. комерційна інформація; 4. е-інформація. Вірна відповідь.

**Тест 228.** Поточні знання, які поступають в АРМ називають: 1. оперативною інформацією; 2. динамічною інформацією; 3. статистичною інформацією; 4. ситуаційною інформацією. Вірна відповідь.

**Тест 229.** АРМ – це комплекс об'єднаних між собою технічних модулів, забезпечених програмними засобами, які: 1. реалізують закінчену інформаційну технологію; 2. вирішують функціональні задачі; 3. вирішують статистичні методи керування; 4. вирішують комплекс задач керування. Вірна відповідь.

**Тест 230.** Пристрій, який виконує функції стиснення даних, їх збереження в системі файлів і швидкого пошуку, називають: 1. сервером; 2. блоком інформації; 3. блоком зв'язку; 4. блоком опитування. Вірна відповідь.

**Тест 231.** Сервери технологічних даних забезпечують: 1. обмін інформацією між технологічними пристроями; 2. і мережею персональних комп'ютерів; 3. протокол роботи з технологічними пристроями; 4. стиснення даних. Вірна відповідь.

**Тест 232.** Основні об'єкти керування в харчовій промисловості є складними об'єктами з: 1. розподіленими параметрами; 2. стохастичними параметрами; 3. квазіпараметрами; 4. статистичними параметрами. Вірна відповідь.

**Тест 233.** Основні об'єкти керування в харчовій промисловості є складними об'єктами з: 1. розподіленими параметрами; 2. квазірозподіленими параметрами; 3. одноконтурними параметрами; 4. змінними параметрами. Вірна відповідь.

**Тест 234.** У холодильних компресорних машинах крім температури і вібрацій регулюються: 1. лише тиск конденсації; 2. витрати води на конденсатор; 3. заповнення випарника, тиск конденсації, витрати води на конденсатор; 4. замерзання води. Вірна відповідь.

**Тест 235.** Автоматизація випарної станції цукрового заводу побудована на: 1. мікропроцесорних системах керування густини сиропу; 2. системах регулювання тиску сокової пари; 3. системах стабілізації рівня соку у випарних апаратах; 4. системах ручного керування. Вірна відповідь.

**Тест 236.** Математичні моделі масообмінних процесів побудовані на основі законів: 1. масопередачі; 2. масообміну; 3. дифузії; 4. Фіко. Вірна відповідь

**Тест 237.** Теплообмінний апарат зазвичай представляють у вигляді комбінації різних ланок: 1. запізнення, підсилення та інерційності; 2. аперидичної другого порядку; 3. інтегрування; 4. лише запізнення. Вірна відповідь.

**Тест 238.** Система автоматизації хлібопекарської печі передбачає: 1. регулювання температури пекарської камери та регулювання температури топкових газів; 2. багаторівневе керування технологічними процесами; 3. адаптивне керування; 4. регулювання витрати газу. Вірна відповідь.

**Тест 239.** У харчовій промисловості використовують газоаналізатори – прилади, що ґрунтуються на вимірюванні теплових властивостей контрольованого компонента газової суміші, які: 1. залежать від його концентрації; 2. залежить від його якості; 3. залежить від його калорійності; 4. залежать від температури суміші. Вірна відповідь.

**Тест 240.** САР є статичною, якщо статична похибка відмінна від нуля, і астатичною, якщо статична похибка: 1. не дорівнює нулю; 2. дорівнює дисперсії похибки; 3. дорівнює нулю; 4. є усталеною. Вірна відповідь.

**Тест 241.** Якщо в САР використовувати комбінований принцип регулювання (за відхиленням і збуренням), то можливо залишковий вплив збурення зменшити до нуля, а систему зробити до цього збурення: 1. інваріантною; 2. адаптивною; 3. інтелектуальною; 4. експертною. Вірна відповідь.

**Тест 242.** З метою вибору закону регулювання аналізують динамічні властивості технологічного об'єкту керування (ТОК), орієнтовано на співвідношення: 1. величини запізнення  $t$  до сталої часу  $T$  об.; 2. величини запізнення і сталої часу; 3. лише запізнення і час ізодрому; 4. запізнення і час упередження. Вірна відповідь.

**Тест 243.** Сучасні автоматизовані системи керування технологічними процесами є ієрархічно-розподіленими цифровими системами, основними компонентами яких є: 1. екстремальні системи; 2. робочі станції (РС); 3. адаптивні системи; 4. нейронечіткі регулятори. Вірна відповідь.

**Тест 244.** При проектуванні АСУКТП (АСУТП) використовують підхід декомпозиції системи, який називають: 1. системним; 2. структурним; 3. процесним; 4. програмним. Вірна відповідь.

**Тест 245.** Програмне забезпечення багаторівневої АСУТП розробляють на засадах: 1. алгоритмічного аналізу технологічного процесу; 2. статистичного аналізу технологічного процесу; 3. математичного та лінгвістичного забезпечень; 4. відповідної документації. Вірна відповідь.

**Тест 246.** Витрати рідинних продуктів у каскадних САР продуктивності насосів з АД-приводами змінюють за допомогою: 1. частотних перетворювачів; 2. фазових регуляторів; 3. імпульсних систем; 4. частотно-імпульсних систем. Вірна відповідь.

**Тест 247.** У сушарках регулюють наступні параметри: 1. лише температуру і тиск; 2. лише вологість; 3. температуру і вологість; 4. температуру, вологість і розрідження газів. Вірна відповідь.

**Тест 248.** Ефективність САР дифузійного апарата визначається: 1. його продуктивністю, вмістом цукру у дифузійному соку та витратами цукру в жомі; 2. лише витратами цукру в жомі; 3. комплексом технологічних параметрів вмісту цукру; 4. параметрами коливань витрат цукру в жомі. Вірна відповідь.

**Тест 249.** Тістові заготовки випікають у хлібопекарських тунельних печах з пекарськими камерами, в яких рухається конвеєр із сітчастим подом і адаптивною системою керування побудованою з інтерфейсом оператора на базі: 1. вбудованої SCADA-системи візуалізації; 2. панелі оператора КР-300; 3. лише панелі оператора; 4. будь-якого комп'ютера. Вірна відповідь.

**Тест 250.** Інтернет-технології – це: 1. автоматизоване середовище отримання лише інформації; 2. отримання нових знань; 3. технології використання інформації та знань; 4. автоматизоване середовище отримання, оброблення, збирання, передачі й використання знань у вигляді інформації. Вірна відповідь.

**Тест 251.** Електромеханічний привід ВМ складається із: 1. електродвигуна та механічного перетворювача; 2. електродвигуна та теристорного перетворювача; 3. гальмівних пристроїв і електродвигуна; 4. імпульсних крокових систем. Вірна відповідь.

**Тест 252.** Інтегрувальна ланка має вихідну величину в будь-який момент часу, пропорційну: 1. похідній вхідної величини; 2. швидкості зміни вхідної величини; 3. інтегралу вхідної величини; 4. прискоренню вхідної величини. Вірна відповідь.

**Тест 253.** Ідеальна диференціальна (без інерційна) ланка має вихідну величину пропорційну: 1. похідній за часом від вхідної величини; 2. прискоренню вхідної величини; 3. похідній від вхідної величини; 4. похідній за часом від вхідної величини. Вірна відповідь.

**Тест 254.** Принцип максимуму є необхідною і достатньою умовою оптимальності процесу керування для лінійних об'єктів, а для нелінійних: 1. лише необхідним; 2. група допустимих керувань; 3. недопустимих керувань; 4. коли керування набуває певних значень. Вірна відповідь.

**Тест 255.** Для простих об'єктів при синтезі автоматичних систем регулювання враховують показники, які безпосередньо впливають на динаміку АСР: 1. самовирівнювання, ємність і запізнювання в об'єктах; 2. лише самовирівнювання і ємність; 3. лише ємність; 4. запізнювання. Вірна відповідь.

**Тест 256.** Здатність акумулювати речовину чи енергію в процесі функціонування або в процесі керування ним називають: 1. оптимізацією; 2. ємністю об'єктів; 3. самовирівнюванням; 4. запізнюванням. Вірна відповідь.

**Тест 257.** Адекватність математичних моделей визначають порівнянням розрахунку реакції моделі з отриманою експериментально реакцією самого об'єкта моделювання у тих самих і на те саме збурення, тобто: 1. адекватність



може визначатись похибкою розрахункової та експериментальної характеристик; 2. або середньоквадратичною похибкою моделі; 3. адекватність оцінюють аналізом впливу збурень на систему; 4. лише адекватністю експериментальних характеристик. Вірна відповідь.

**Тест 258.** Під адекватністю моделей розуміють їх відповідність об'єкту моделювання тобто: 1. можливість в межах задачі дослідження застосовувати аналоги; 2. можливість застосовувати моделі замість об'єктів у певних задачах; 3. можливість застосувати спеціальні методи оцінки об'єкта; 4. відповідність деяким критеріям. Вірна відповідь.

**Тест 259.** Метод числового інтегрування – це: 1. класичний метод Ейлера; 2. Рунге; 3. Адамса; 4. Кутта. Вірна відповідь.

**Тест 260.** Одним із основних мотивів використання зворотного зв'язку є: 1. можливість зменшення сталої похибки; 2. збільшення чутливості системи; 3. збільшення надійності системи; 4. зменшення реакції системи на об'єкт. Вірна відповідь.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Автоматизовані системи керування виробництвом смарт-продуктів харчування: монографія/ В.П. Хорольський, Ю.М. Коренець, В.М.Серебренников – Кривий Ріг:Видавець Чернявський Д.О., 2021. – 312с.
2. Автоматизація виробничих процесів: навч.посібник/ Б.М. Гончаренко,С.І. Осадчий,Л.Г.Віхрова [та ін.] Кіровоград: Лисенко В.Ф.,2016-352с.
- 3.Автоматизація виробничих процесів харчових технологій: підручник / Гончаренко Б.М.,Ладанюк А.П. -. Київ: НУХТ, 2014- 530с.
4. Автоматизація виробничих процесів: підручник/ І. В. Ельперін, О. М. Пупена. В. М. Сідлецький, С.М. Швед; Національний університет харчових технологій-2-ге вид., випр.-Київ: Ліра-К. 2015.- 378с.
5. Автоматизація виробничих процесів: підручник / О. І. Черевко, Л.В. Коптева, В. М. Михайлов, О.Є. Загорулько; Харк. держ. ун-т харчових технологій – Харків. 2014.- 186с.
- 6..Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування/О.В. Барало,П.Г. Самойленко, С.Є. Грант - Київ: навчальн. посібник. Аграрна освіта,2010-245с.
7. Васильківський І.С., Фединець В. О., Юсик Я.П. Виконавчі пристрої систем автоматизації. Львів,2020.220с.
- 8.. Нестеренко О.В., Ковтунець О.В.,Фаловський О.О. Інтелектуальні системи і технології.Ввідний курс: навчальний посібник.- К.: Національна академія управління, 2917- 90с.
9. Dorf R.C.,Bishop R.H. Modern Control Systems ninth edition Prentice Hall Upper Saddle River Nj07458 - 2001.( Современные системы управления / Р.Дорф,Р.Бишоп,пер.с англ..Б.И.Копылова.-М.: Лаборатория Базових Знаний, 2004.-832с.)
10. Ельперін І.В. Автоматизація виробничих процесів.Київ,2017.378с.
- 11.Згуровський М.З. Основи системного аналізу:підручник/ М.З. Згуровський, Н.Д.Панкратова -К.: Видавнича група ВНУ,2007.-544 с.
12. Зайцев Г.Ф. Теорія автоматичного управління/Г.Ф. Зайцев,В.К.Стеклов, О.І.Брицький: підручник / За ред. проф. Г.Ф. Зайцева.К.: Техніка,2002.-688с.
13. Інтелектуальні системи управління виробництвом хлібобулочних виробів: монографія/ В.П.Хорольський, Ю.М.Коренець,А.В. Возняк, О.В. Омельченко, Д.П. Заїкіна, О.К.Копайгора, А.В.Шеїна - Кривий Ріг: Видавець ФО-П Чернявський Д.О.-2019.- 204с
14. Корченний М.О.,Клендій П.Б.,Потапенко М.В.Теоретичні основи автоматики. Київ.2012.303с.
15. Кубрак А.І.,Жученко А.І., Кваско М.З. Комп'ютерне моделювання та ідентифікація автоматичних систем: Навч.посіб.-К.: Політехніка,2004.-424с.
- 16.Ладанюк А.П.,Заєць Н.А.,Власенко Л.О. Сучасні технології конструювання систем автоматизації складних об'єктів: монографія. Київ:Ліра-К.,2016.312с.
- 17.Ладанюк А.П., Смітюх Я.В.,. Власенко Л.О. Заєць Н.А, Ельперін І.В. Системний аналіз складних систем управління К.:НУХТ,2013.274с
- 18.Ловейкін В.С. Мехатроніка: навч. посібник/ В.С. Ловейкін,Ю.С.Ромасевич,Ю.В.Човнюк.-К.: «Компринт»,2012-358с.

19. Основи вимірювань і автоматизації технологічних процесів: підручник/ А.К.Бабіченко, В.І.Тошинський, Ю.А.Бабіченко та ін.. За заг. ред.. А.К.Бабіченко-Харьков: ТОВ. «С.А.М.»,2009.-616с.
20. Нейротехнології та нейросистеми: монографія / Л. С. Ямпольський,-К.: ДррадоДрук,2015 -508с.
21. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: підруч.- 2-е вид. перероб. і доп.-К.: Лебідь,2007.-656с.
- 22.Промислові засоби автоматизації: Навч.посіб./А.К.Бабіченко,В.І.Тошинський, В.С.Михайлов та ін. За заг.ред.А.К.Бабіченка.-У 2ч.- Ч1: Вимірювальні пристрої.\_ Харьков:НТУ»ХП» 2003.-470с.
23. Проць Я.І.,Савків В.Б.,Шкодівський О.К.,Ляшук О.Л. Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів.- Тернопіль: ТНТУім.І.Пулюя,2011.-344с.
24. Проць Я.І. Захоплювальні пристрої промислових роботів/ Я.І.Проць. Навчальний посібник.-Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя,2008.-232с.
25. Руденко О.Г., Бородянський Є.В. Штучні нейронні мережі: навчальний посібник-Харьків ТоВ«Компанія СМІТ»,2006-404с.
26. Савицький В. Технічні засоби автоматизації. Львів. 2018. 242с.
27. Довбиш А.С. Основи теорії розпізнавання образів: навчальний посібник у 2-х частинах/ А.С.Довбиш, І.В.Шеховцов.\_ Суми: Сумський державний університет, 2015, ч1-109с.
- 28..Сучасні електромехатронні комплекси і системи: навч. посібник/ Т.П.Павленко, В.М.Шавкун.О.С.Козлова,Н.П.Лукашова;Харків. нац.. ун-т міськ.госп.-ва ім. О.М.Бекетова.-Харків: ХНУМГ ім.О.М.Бекетова, 2010.-116с.
29. Тітлов О. С., Горикін С.Ф. Холодильне обладнання підприємств харчової промисловості: навч. посіб. Львів: Новий світ, 2011. 286 с.
- 30.Ткачук В. Електромеханотроніка: навч. посібник.-Львів.Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка»,2001-404с.
31. Трегуб В. Г. Основи комп'ютерного –інтегрованого керування (інтегровані автоматизовані системи керування): навч. посібник. К.:НУХТ,2005-192 с.
32. Трегуб В.Г. .Проектування систем автоматизації: навч. посібник.К.:Ліра-К 2014.342с..
- 33.Хмельнюк М. Г., Подмазко О. С., Подмазко І. О. Холодильні установки та сфери їх використання: підручник. Херсон: ФОП Грінь Д. С., 2014. 484 с.
- 34.Холодильні установки: підручник / за ред. І. Г. Чумака. Одеса: Рефпринтінфо, 2006. 550 с.
35. Цвіркун Л.І. Робототехніка та мехатроніка: навч.посібник/ Л.І.Цвіркун,Г.Грулер;Нац. гірничий ун-т.-2-ге вид.,випр.- Дніпропетровськ.НГУ,2010-224с.
36. Цифрові системи інтелектуального управління підприємствами промислового комплексу регіону: монографія / В.П.Хорольський, О.В.Хорольська. І.П.Діянов -Кривий Ріг: Видавець ФО-П Чернявський Д.О.- 2020.- 564с

37. Яглінський В.П. Торгачев Д.В. Моделювання динамічних процесів роботизованого виробництва- Одеса Астро Прінт,2004.-234с.
38. Ямпольський Л.С., Лавров О.А. Штучний інтелект у плануванні та управлінні виробництвом.-К.: Вища школа,1995-255с.
39. Мікроархітектура процесорів Intel Itanium 2 [Електронний ресурс]- URL:<http://MSU-Intel|Itanium2/html>
40. Сайт корпорації Intel Corporation[Електронний ресурс]- URL: <http://www.intel.com>.
41. Сайт корпорації AMD [Електронний ресурс]- URL: <http://www.amd.com>.
42. Simens-Industrie4.0-[ Electronic resource].- URL.:[www.siemens.com](http://www.siemens.com)
43. Moore C. A. Automation in the Food Industry Springer 2012. 232p
- 44.Rosana G. Moreira Automatic Control for Food Processing Systems Springer.2001. 346p
45. Hitzmann Bernd. Measurement Modeling and Automation in Advanced Food Processing. Springer 2017.205p

### СПИСОК ДОДАТКОВОЇ ЛІТЕРАТУРИ

46. Автоматизація холодильних машин і установок: лабораторний практикум/ уклад. Ю.Б. Беляєв, В.М. Сідлецький.М. І.Іванченко. Національний університет харчових технологій- Київ: НУХТ, 2016.-61с
47. Левченко О.І. Автоматизація холодильних машин і установок: курс лекцій/ О.І. Левченко; Національний університет харчових технологій.- Київ: НУХТ, 2007- 97с.
48. Луцька Н.М., Ладанюк А.П. Оптимальні та робастні системи керування технологічними об'єктами: монографія – К.:Видавництво Ліра-К,2015.-288с.
- 49.Хорольський В.П. Проектування робототехнологічного комплексу з виробництва хліба для територій з техногенним тиском / В.П. Хорольський, Ю.М. Коренець // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – Хмельницький, 2018. – № 1 (257). – С. 256-263.
- 50.Хорольський В.П. Ідентифікація процесу приготування тіста в полі ультразвукових коливань / В.П. Хорольський, Ю.М. Коренець, А.В. Шеїна // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – Хмельницький, 2018. – № 2 (259). – С. 115-123.
51. Хорольський В. П., Омельченко О. В., Коренець Ю. М., Гончаренко В. А., Петрушина Ю. М. Холодозабезпечення холодильних камер смарт-промислових холодильників із системами нейро-нечіткого керування процесами заморожування продуктів харчування. Вісник Хмельницького Національного Університету. 2021. № 6. С. 264–271.
52. Хорольський В. П., Коренець Ю. М., Копайгора О. К., Заїкіна Д. П., Невідін В. І. Автоматизовані системи керування виробництвом заморожуваних продуктів харчування. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. Хмельницький, 2020. № 6 (291), С. 199–206.
- 53..Хорольський В. П., Коренець Ю. М., Копайгора О. К., Заїкіна Д. П., Кузьменко А. О., Невідін В. І. Інформаційна система керування виробництвом харчових смарт-продуктів з технологіями заморожування. Обладнання та

- технології харчових виробництв. Кривий Ріг: ДонНУЕТ, 2020. № 2 (41). С. 79–88.
- 54.. Хорольський В. П., Коренець Ю. М., Гончаренко В. А., Яровий Д. В., Расчехмаров І. В. Теоретичні основи багаторівневого автоматизованого керування холодозабезпеченням промислових холодильників. Обладнання та технології харчових виробництв. Кривий Ріг: ДонНУЕТ, 2021. Вип. 2 (43). С. 122–130.
55. Нікіфоров Р.П., Сабіров О.В., Сімакова О,О. та ін... Технологія м'ясної продукції і використання високого тиску: монографія. Кривий Ріг: ДонНУЕТ, 2021, 136с.
56. Вашпанов Ю.О. Сучасні сенсори автоматичних систем: навчальний посібник.-Одеса:ВМВ,2014.-240с.
57. Синтез робототехнічних систем в машинобудуванні: підручник /Л. Є Пелевін, К. І. Почка, О.М.Гаркавенко та ін.. Київ. Націон.у-т буб-ва і архітектури.К.: ТОВ НВП «Інтерсерфіс», 2016.-258 с.
58. Фурман І.О. Мікропроцесорні пристрої програмного керування/ І.О.Фурман, В.О.Романов,І.В.Чалий; М-во освіти України.-К.,2000.-88с.
60. Тошинський В.І. Технічні засоби автоматизації/ В. І. Тошинський, А.К. Бабіченко, П.І. Беляк,М.О.Подустов.-К.:ІСДО,1995.-104с.
61. Хорольський В.П. Інтелектуальна система управління та моніторингу робочих характеристик технологічного обладнання хлібобулочних заводів/ В.П. Хорольський,Д.Ю.Клюєв,С.М. Коржов// Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.2016-№6-С.55-62
- 62.Хорольський В.П.,Коренець Ю.М. Проектування робототехнологічного комплексу з виробництва хліба для територій з техногенним тиском/ В.П. Хорольський,Ю.М. Коренець. // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.2018-№1-С.256-263.
63. Головка Д.Б.,Рего К.Г., Скрипник Ю.О. Автоматика і автоматизація технологічних процесів: підручник.-К.:Либідь,1997.-232с.
64. Сухенко Ю.Г.,Литвиненко О.А.,Сухенко В.Ю. Надійність і довговічність устаткування харчових і переробних виробництв: Підручник.- К.; НУХТ,2010.-547с.
65. Енциклопедія кібернетики: Головна редакція УРЕ.Київ 1974 (в двох томах)Том 1-607с. Том 2-620с.
- 68.Домарецький В.А.,Остапчук М.В.,Українець А.І. Технологія харчових продуктів-К.:НУХТ,2003-572с
- 69.Valentyn Khorolskyi, Oleksandr Bavyko, Svitlana Yermak, Yekateryna Riabykina, Kostiantyn Khorolskyi (2018), Innovative functional food products for the workers of the mining industry, Journal of Hygienic Engineering and Design, Volume 24, P. 55–62. (<https://keypublishing.org/jhed/wp-content/uploads>)
- 70.Щокін В.П., Голіков С.П.,Кваско,С.Г.Чорний Моделювання складних процесів та систем в галузі автоматизації з використанням сучасних інформаційних технологій: монографія-К.: Центр учбової літератури,2012.-216 с.

**ДОДАТОК**  
**Таблиця: Відповіді до тестів**

№ теста	відповідь	тест	відповідь	тест	відповідь		
1	3	43	3	85	2	127	1+2+3
2	2	44	1	86	1	128	1
3	2	45	1	87	2	129	2+3
4	2	46	1	88	2	130	1+2
5	1	47	2	89	2	131	1
6	4	48	2	90	1	132	1
7	2	49	3	91	1	133	1
8	3	50	1	92	1	134	3
9	3	51	2	93	3	135	2
10	3	52	1	94	1	136	1+2
11	2	53	2	95	3	137	1
12	3	54	1	96	3	138	1+2
13	3	55	3	97	2	139	1
14	1	56	3	98	1	140	3
15	2	57	1	99	2	141	2
16	3	58	4	100	3	142	1
17	1	59	2	101	2,3	143	2
18	1	60	1	102	2	144	1+2+3+4
19	2	61	2	103	3	145	1
20	2	62	3	104	4	146	2
21	1	63	1	105	3	147	1
22	3	64	1	106	1+2+3+4	148	1
23	1	65	2	107	1	149	2
24	1	66	1	108	3	150	2
25	1	67	1	109	1	151	4
26	2	68	4	110	3	152	3
27	1	69	2	111	4	153	2
28	4	70	1	112	1	154	1+2
29	1	71	2	113	1	155	1
30	1	72	1	114	1	156	1
31	1	73	4	115	3	157	1+2+3
32	1	74	2	116	1	158	1
33	2	75	3	117	1	159	1+2
34	1	76	2	118	2	160	1+2
35	1	77	3	119	2	161	2
36	2	78	3	120	2	162	2
37	2	79	1	121	2	163	1+2
38	1	80	2	122	1	164	2
39	3	81	2	123	1	165	1
40	3	82	1	124	1,2,3+4	166	2
41	2	83	2	125	2+3	167	1
42	2	84	1	126	3+4	168	1
						169	3

**Таблиця: Відповіді до тестів (продовження)**

№ теста	відповідь	тест	відповідь	тест	відповідь		
170	2	201	1	230	1		
171	3	202	2+3	231	1+2+3+4		1
172	2	203	1	232	1		
173	1+2+3	204	4	233	1		
174	2+4	205	1	234	3		
175	1	206	1	235	1		
176	1+2+3	207	2+4	236	1+4		
177	1+2	208	2+3	237	1		
178	1	209	2	238	1		
179	1	210	3	239	1		
180	2	211	1+3	240	3		
181	2	212	1	241	1		
182	3	213	1	242	1		
183	2	214	1+3	243	2		
184	2	215	1+3	244	1		
185	1	216	1+2+3	245	3		
186	2	217	2	246	1		
187	1	218	2	247	4		
188	1	219	3	248	1		
189	1	220	4	249	1+2		
190	1	221	1+2+3+4	250	4		
191	1	222	2	251	1		
192	1	223	1	252	3		
193	2	224	1	253	1		
194	1	225	1	254	1+2		
195	2	226	1+2	255	1		
196	3	227	1+2	256	2		
197	2	228	1	257	1+2		
198	1	229	1	258	2		
199	1			259	1		
200	3			260	1		

*Наукове видання*

ХОРОЛЬСЬКИЙ В.П., КОРЕНЕЦЬ Ю.М.

# АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

## Підручник

В авторській редакції

Підготовка до друку: Журавльова Ю.О.

Підписано до друку 07.09.2023 р.

Формат 64x84 1/16.

Друк цифровий лазерний та світлодіодний.

Об'єм 23,5 ум. друк. аркушів.

Тираж 300 екз.



Друк: Видавець Чернявський Д.О.

пр. 200-річчя Кривого Рогу, 17, (зуп. «Спаська»),

тел.: (067) 46-46-102

Свідоцтво ДК 3449 від 02.04.2009 р.

 [oktanua](#)  [oktanua](#)  [oktanprint@ukr.net](mailto:oktanprint@ukr.net)

 +38 (067) 46-46-102 

 [oktanprint.com.ua](http://oktanprint.com.ua); [oktanshop.com](http://oktanshop.com); [oktanprint.cz](http://oktanprint.cz)

ДРУКАРНЯ  ОКТАН-ПРИНТ