

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ



Інженерно-енергетичний факультет
Кафедра загальнотехнічних дисциплін

**Управління якістю та оптимізація технологічних
параметрів обладнання в агроінженерії:**

конспект лекцій для здобувачів другого (магістерського) рівня
вищої освіти ОПП «Агроінженерія» спеціальності
Н7 «Агроінженерія» денної та заочної форм здобуття вищої освіти

Миколаїв
2026

УДК 631.3:006.015.5:519.87

У-66

Рекомендовано до друку рішенням науково-методичної комісії інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету від 22.09.26, протокол №1.

Укладач:

Н. А. Доценко – д-р. пед. наук, канд.техн. наук, професор, професор кафедри загальнотехнічних дисциплін, Миколаївський національний аграрний університет

Рецензенти:

В. М. Зубко – д-р техн.наук, професор, професор кафедри механічної та електричної інженерії, Полтавський державний аграрний університет

О. С. Садовий – канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри агроінженерії, Миколаївський національний аграрний університет

© Миколаївський національний аграрний університет, 2026

© Доценко Н. А., 2026

ЗМІСТ

ЗМІСТ	3
Вступ.....	6
ЛЕКЦІЯ 1. <i>Виробничо-технологічні системи в агроінженерії: структура та функції</i>	7
1. Поняття виробничо-технологічної системи та її складові	7
2. Рівні організації агроінженерних систем	12
3. Функціональні зв'язки між елементами системи	17
4. Показники ефективності функціонування систем	22
5. Роль агроінженерії у формуванні виробничих систем	27
Контрольні питання	27
ЛЕКЦІЯ 2. <i>Теоретичні основи формування технологічних процесів у сільському господарстві</i>	28
1. Поняття технологічного процесу та його структура.....	28
2. Етапи формування технологічних операцій	33
3. Взаємозв'язок біологічних і технічних процесів	38
4. Ресурсне забезпечення технологічних процесів.....	43
5. Критерії ефективності агротехнологій	48
Контрольні питання	49
ЛЕКЦІЯ 3. <i>Системний підхід до аналізу виробничих процесів та характеристика технологічних систем аграрного виробництва</i> ..	50
1. Основи системного аналізу	50
2. Вхідні та вихідні параметри системи.....	55
3. Зворотні зв'язки в технологічних системах та декомпозиція складних виробничих процесів	61
4. Методи оцінювання ефективності систем	61
5. Типи систем у рослинництві та механізовані та автоматизовані системи	62
6. Параметри оцінки систем та вплив зовнішніх умов	63

Контрольні питання	64
ЛЕКЦІЯ 4. <i>Основи математичного моделювання виробничих процесів</i>	65
1. Поняття математичної моделі.....	65
2. Типи моделей (детерміновані, стохастичні)	69
3. Вхідні та вихідні змінні	74
4. Побудова моделей виробничих процесів	75
Контрольні питання	83
ЛЕКЦІЯ 5. <i>Показники якості продукції та методи їх оцінювання</i>	84
1. Поняття якості продукції	84
2. Кількісні та якісні показники.....	87
3. Методи контролю якості	89
4. Стандарти та нормативи.....	93
5. Системи оцінювання.....	96
Контрольні питання	101
ЛЕКЦІЯ 6. <i>Методи контролю та управління якістю в агровиробництві</i>	102
1. Системи управління якістю	102
2. Оперативний контроль процесів	107
3. Моніторинг технологічних операцій	111
4. Коригувальні дії	115
5. Стандартизація процесів	120
Контрольні питання	126
ЛЕКЦІЯ 7. <i>Технологічні параметри виробничих процесів та їх вплив</i>	127
1. Основні технологічні параметри.....	127
2. Вплив параметрів на продуктивність	127
3. Зв'язок параметрів і якості	127
4. Регулювання режимів роботи	127
5. Оптимальні значення параметрів	127
Контрольні питання	146

ЛЕКЦІЯ 8. <i>Комплексна оптимізація, стабільність та прийняття інженерних рішень в агроінженерії</i>	147
1. Комплексна оптимізація технологічних параметрів.....	147
2. Стабільність і надійність технологічних процесів та обладнання	150
3. Прогнозування та управління якістю технологічних процесів .	152
4. Прийняття інженерних рішень на основі результатів оптимізації	154
5. Комплексне управління «якість – параметри – надійність – ресурси» Завершальним етапом розвитку системи управління технологічними процесами є перехід до комплексного управління.	156
Контрольні питання	159
Список використаних джерел:.....	161

Вступ

Конспект лекцій з дисципліни «Управління якістю та оптимізація технологічних параметрів обладнання в агроінженерії» призначений для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня за освітньо-професійною програмою «Агроінженерія».

Конспект охоплює 8 лекцій, у яких послідовно розглянуто основні теоретичні та прикладні аспекти управління якістю технологічних процесів і оптимізації параметрів обладнання в агроінженерії. Матеріал спрямований на формування у здобувачів системного розуміння закономірностей функціонування технологічних систем, принципів забезпечення якості продукції та ефективності роботи технологічного обладнання.

Структура кожної лекції передбачає план заняття, ключові терміни українською та англійською мовами, теоретичний матеріал, основні розрахункові залежності з поясненням позначень, ілюстративні матеріали та контрольні питання для перевірки рівня засвоєння навчального матеріалу.

Особливу увагу приділено сучасним підходам до математичного моделювання, статистичного контролю якості, визначення та оптимізації технологічних параметрів, оцінювання енерго- і ресурсоощадності, а також використанню цифрових технологій у проєктуванні та управлінні технологічними процесами агропромислового виробництва.

Матеріали конспекту можуть бути використані під час лекційних занять, самостійної роботи здобувачів, підготовки до практичних занять, модульного та підсумкового контролю знань.

ЛЕКЦІЯ 1. *Виробничо-технологічні системи в агроінженерії: структура та функції*

План

1. Поняття виробничо-технологічної системи та її складові
2. Рівні організації агроінженерних систем (елемент, машина, комплекс, система)
3. Функціональні зв'язки між елементами системи
4. Показники ефективності функціонування систем
5. Роль агроінженерії у формуванні виробничих систем

Ключові слова: виробничо-технологічна система (production system); структура (structure); функції (functions); агроінженерія (agroengineering); ефективність (efficiency)

1. Поняття виробничо-технологічної системи та її складові

Виробничо-технологічна система агропромислового виробництва – це впорядкована сукупність технічних засобів, технологічних процесів, ресурсів та обслуговуючого персоналу, об'єднаних спільною метою випуску сільськогосподарської продукції із заданими показниками якості та кількості. На відміну від окремої машини, система характеризується не лише складом елементів, а й сукупністю зв'язків між ними, які визначають узгоджене функціонування всієї сукупності в часі й просторі.

Виробничо-технологічна система функціонує за принципом «вхід – процес перетворення – вихід». На її вході знаходяться сировина, матеріали, енергетичні та трудові ресурси, інформація про параметри виробництва. У процесі функціонування системи здійснюється технологічне перетворення сировини за допомогою відповідного обладнання та технологічних операцій. Результатом є готова продукція, характеристики якої повинні відповідати встановленим вимогам.

До основних складових виробничо-технологічної системи належать:

1. Технічна підсистема – машини, технологічне обладнання, транспортні засоби, приводи, енергетичні установки, контрольно-

вимірювальні прилади та автоматизовані системи. Вона забезпечує безпосереднє виконання технологічних операцій. Ефективність її роботи визначається продуктивністю, надійністю, енергоємністю, точністю та відповідністю обладнання заданим технологічним вимогам.

2. Технологічна підсистема – сукупність технологічних операцій, методів і режимів їх виконання, послідовність переміщення та обробки матеріалу. До основних технологічних параметрів належать температура, вологість, швидкість руху робочих органів, продуктивність, тиск, тривалість обробки та інші показники залежно від конкретного процесу.

3. Організаційна підсистема – планування та оперативне управління виробництвом, організація взаємодії між окремими технологічними операціями, контроль виконання виробничих завдань, облік ресурсів і результатів роботи. Її завданням є забезпечення узгодженості функціонування всіх елементів системи.

4. Ресурсна підсистема – сировина, матеріали, паливо, електрична та теплова енергія, вода, трудові ресурси та інші засоби, необхідні для функціонування виробництва. Раціональне використання ресурсів безпосередньо впливає на собівартість продукції, її якість та загальну ефективність виробництва.

5. Інформаційна підсистема – сукупність інформації про стан обладнання, технологічні параметри, якість сировини та готової продукції, витрати ресурсів і результати виробничого процесу. Вона забезпечує прийняття управлінських рішень та оперативне коригування режимів роботи системи.

6. Підсистема контролю та управління забезпечує вимірювання технологічних параметрів, порівняння їх із заданими значеннями та формування керуючих впливів. Сучасні виробничо-технологічні системи дедалі частіше використовують автоматизовані засоби контролю, датчики, мікропроцесорні системи та програмовані контролери, що дає змогу підтримувати оптимальні режими роботи обладнання.

Кожна із зазначених підсистем має власні показники стану та ефективності, проте кінцевий результат функціонування виробничо-технологічної системи визначається не окремими характеристиками, а узгодженою взаємодією всіх її складових. Наприклад, високопродуктивне обладнання не забезпечить необхідної якості продукції за неправильно вибраного технологічного режиму або недостатньої якості сировини.

Важливою характеристикою виробничо-технологічної системи є її структура та взаємозв'язки між елементами. Вона може включати окремі технологічні лінії, дільниці, машини та агрегати, які функціонально пов'язані між собою. Зміна режиму роботи одного елемента може спричинити зміну навантаження на інші елементи, що потребує їх синхронізації та координації.

Управління виробничо-технологічною системою передбачає моніторинг, аналіз та оптимізацію технологічних параметрів. Основними критеріями оптимізації можуть бути максимальна продуктивність, мінімальні питомі енерговитрати, зниження втрат сировини, забезпечення необхідної якості продукції, підвищення надійності обладнання та зменшення експлуатаційних витрат.

Таким чином, виробничо-технологічну систему агропромислового виробництва можна розглядати як динамічну, взаємопов'язану та керовану систему, ефективність якої залежить від оптимального поєднання технічних, технологічних, ресурсних, організаційних та інформаційних складових. Саме системний підхід дає змогу забезпечити стабільність технологічного процесу, підвищити якість продукції, зменшити витрати ресурсів та досягти максимальної ефективності агропромислового виробництва.

Функціонування виробничо-технологічної системи можна представити у вигляді послідовності взаємопов'язаних етапів:

вхідні ресурси → технологічний процес → контроль і управління → готова продукція

До вхідних ресурсів належать:

- ✓ сировина та матеріали;
- ✓ енергетичні ресурси;

- ✓ трудові ресурси;
- ✓ технічні засоби;
- ✓ інформація про умови та параметри виробництва.

У процесі технологічного перетворення відбувається послідовна зміна властивостей сировини відповідно до заданої технології. При цьому машини та обладнання виконують визначені технологічні операції, а система контролю забезпечує вимірювання основних параметрів і підтримання їх у встановлених межах.

Керування системою здійснюється за принципом зворотного зв'язку. Фактичні значення технологічних параметрів порівнюються із заданими, після чого за необхідності змінюються режими роботи обладнання.

Наприклад, якщо під час сушіння зерна фактична вологість продукції перевищує встановлене значення, система управління може збільшити тривалість сушіння або змінити температуру та витрату теплоносія. Таким чином забезпечується стабільність процесу та необхідна якість продукції.

Схематично принцип зворотного зв'язку можна представити так: задане значення параметра → система управління → обладнання → технологічний процес → фактичне значення → контроль → система управління

Застосування автоматизованого контролю та регулювання дає змогу своєчасно виявляти відхилення технологічних параметрів і коригувати режим роботи обладнання.

Показники ефективності виробничо-технологічної системи

Ефективність ВТС характеризується системою техніко-економічних і технологічних показників, які дають змогу оцінити якість її функціонування та визначити можливості для подальшої оптимізації.

1. Продуктивність системи – кількість продукції, яка виробляється за одиницю часу:

$$Q = M / t,$$

де Q – продуктивність, кг/год або т/год;

M – кількість виробленої продукції, кг або т;

t – час роботи системи, год.

Підвищення продуктивності є одним із основних напрямів удосконалення виробничо-технологічної системи, однак воно не повинно призводити до погіршення якості продукції або істотного збільшення енерговитрат.

2. Якість готової продукції характеризується сукупністю показників, установлених технологічними та нормативними вимогами. Для сільськогосподарської продукції це можуть бути вологість, чистота, засміченість, пошкодження зерна, схожість насіння, вміст домішок та інші показники.

3. Питомі енерговитрати характеризують кількість енергії, витраченої на виробництво одиниці продукції:

$$e = E / M,$$

де e – питомі енерговитрати, кВт·год/т або МДж/т;

E – загальні витрати енергії;

M – кількість виробленої продукції.

Зниження питомих енерговитрат є важливим критерієм ресурсоощадності технологічної системи.

4. Матеріаломісткість характеризує витрати матеріальних ресурсів на одиницю виробленої продукції. Зменшення матеріаломісткості забезпечує економію сировини, матеріалів та зниження собівартості продукції.

5. Технологічні втрати – кількість сировини або продукції, яка втрачається під час виконання технологічних операцій. До них можуть належати механічні втрати, втрати під час транспортування, очищення, сушіння, зберігання та переробки.

6. Надійність обладнання визначає здатність технічної системи виконувати задані функції протягом певного часу із збереженням установлених характеристик. Основними показниками надійності є безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність та збережуваність.

7. Собівартість продукції характеризує сукупні витрати на виробництво одиниці продукції. Вона залежить від витрат на

сировину, енергію, оплату праці, технічне обслуговування, ремонт обладнання та інших виробничих витрат.

8. Коефіцієнт використання обладнання характеризує ступінь завантаження машин і технологічних ліній. Низьке завантаження обладнання призводить до нераціонального використання виробничих ресурсів, а надмірне – до перевантаження, зростання енерговитрат і зниження надійності.

Для об'єктивної оцінки виробничо-технологічної системи недостатньо використовувати лише один показник. Наприклад, збільшення продуктивності обладнання може супроводжуватися зростанням енергоспоживання або погіршенням якості продукції.

Тому ефективність ВТС доцільно оцінювати комплексно, враховуючи: продуктивність + якість продукції + енергоефективність + ресурсоощадність + надійність + економічну ефективність.

Особливе значення має визначення оптимального співвідношення між продуктивністю, якістю та ресурсними витратами. Оптимальний режим роботи обладнання – це не обов'язково режим максимальної продуктивності. Він повинен забезпечувати задану якість продукції за мінімально можливих витрат енергії, сировини та інших ресурсів. Таким чином, оцінювання ефективності виробничо-технологічної системи є основою для прийняття рішень щодо вибору раціональних технологічних режимів, модернізації обладнання, автоматизації процесів та оптимізації виробництва.

2. Рівні організації агроінженерних систем

У структурі агроінженерних систем виділяють чотири ієрархічні рівні: елемент (деталь, вузол), машина (сукупність вузлів, що виконує закінчену технологічну функцію), машинний комплекс (сукупність машин, об'єднаних для виконання технологічного циклу) та виробничо-технологічну систему найвищого рівня, що охоплює комплекси, інфраструктуру та управлінські процеси господарства в цілому.

Перехід від нижчого рівня до вищого супроводжується появою нових (емерджентних) властивостей, які не зводяться до простої суми властивостей елементів нижчого рівня. Наприклад, надійність машинного комплексу залежить не лише від надійності окремих машин, а й від резервування, узгодженості режимів роботи та організації технічного обслуговування.

Агроінженерні системи є складними техніко-технологічними утвореннями, функціонування яких відбувається на різних рівнях організації. Кожен рівень має власне функціональне призначення, систему параметрів, критерії оцінювання та взаємозв'язки з іншими рівнями. Такий підхід дає змогу розглядати технологічне обладнання не як окремі технічні об'єкти, а як частини єдиної виробничої системи.

У структурі агроінженерних систем доцільно виділяти чотири основні ієрархічні рівні:

1. Елементний рівень – деталь, складальна одиниця або вузол.

До цього рівня належать окремі конструктивні елементи машин: вали, підшипники, зубчасті передачі, робочі органи, шківів, ланцюги, приводи, корпусні деталі та інші компоненти.

Основними характеристиками елементів є міцність, зносостійкість, точність виготовлення, довговічність, надійність та відповідність конструктивним параметрам. Від технічного стану окремих елементів залежить працездатність вузлів і машини в цілому.

На цьому рівні управління якістю пов'язане переважно з контролем геометричних, фізико-механічних та експлуатаційних характеристик деталей, а також із дотриманням вимог до їх виготовлення, монтажу та технічного обслуговування.

2. Рівень машини – сукупність взаємопов'язаних вузлів та механізмів, призначених для виконання певної технологічної функції.

До машин агроінженерного призначення належать зерноочисні машини, сушарки, транспортери, подрібнювачі, змішувачі, сівалки, ґрунтообробні машини та інше обладнання.

На цьому рівні оцінюються вже не окремі деталі, а функціональні характеристики машини: продуктивність, якість виконання технологічної операції, енергоємність, надійність, безпека, стабільність роботи та відповідність установам технологічним режимам.

Наприклад, для зерноочисної машини важливими параметрами є продуктивність, ступінь очищення зерна, втрати повноцінного зерна, кількість домішок у готовому продукті та питомі енерговитрати.

3. Рівень машинного комплексу – сукупність функціонально та технологічно пов'язаних машин, механізмів і транспортних засобів, які спільно виконують певний технологічний цикл.

Прикладом машинного комплексу може бути технологічна лінія післязбиральної обробки зерна, яка включає приймання, транспортування, очищення, сушіння, сортування та зберігання продукції.

На цьому рівні особливого значення набуває узгодження продуктивності окремих машин. Якщо продуктивність однієї машини істотно відрізняється від продуктивності інших машин комплексу, виникають простої, накопичення матеріалу, перевантаження обладнання або неповне використання його продуктивності.

Тому оптимізація машинного комплексу передбачає вибір і узгодження таких параметрів, як продуктивність, швидкість транспортування матеріалу, потужність приводів, тривалість технологічних операцій, режими роботи робочих органів та пропускна здатність окремих машин.

4. Рівень виробничо-технологічної системи – найвищий рівень, який охоплює сукупність машинних комплексів, інженерну та виробничу інфраструктуру, енергетичні ресурси, персонал, інформаційні системи, організаційні структури та управлінські процеси господарства.

На цьому рівні оцінюється вже загальна ефективність виробництва. Основними критеріями є обсяг і якість продукції,

продуктивність праці, питомі енерговитрати, матеріаломісткість, технологічні втрати, собівартість продукції, надійність обладнання та рівень використання виробничих ресурсів.

Ієрархічні рівні агроінженерної системи не є ізольованими. Вони утворюють взаємопов'язану структуру, у якій зміна параметрів нижчого рівня може впливати на функціонування системи вищого рівня.

Схематично ієрархію можна представити так:

Елемент → Машина → Машинний комплекс → Виробничо-технологічна система

При цьому існує і зворотний зв'язок:

Вимоги виробничої системи → параметри машинного комплексу → параметри машини → вимоги до окремих елементів.

Наприклад, необхідність підвищення продуктивності технологічної лінії може вимагати збільшення продуктивності окремої машини. Це, у свою чергу, потребує зміни швидкості обертання робочих органів, потужності приводу або конструктивних характеристик окремих вузлів.

Таким чином, параметри кожного нижчого рівня повинні відповідати вимогам рівня, що знаходиться вище.

Перехід від нижчого рівня до вищого супроводжується появою емерджентних властивостей – властивостей системи, які виникають у результаті взаємодії її складових і не можуть бути повністю пояснені простою сумою властивостей окремих елементів.

Наприклад, якщо кожна машина машинного комплексу має високу продуктивність, це ще не означає, що весь комплекс працюватиме з такою самою продуктивністю. Реальна продуктивність визначається узгодженістю машин, пропускнуою здатністю транспортних ліній, режимами роботи обладнання та організацією технологічного процесу.

До емерджентних властивостей агроінженерних систем можна віднести: загальну продуктивність технологічної лінії; стабільність технологічного процесу; системну надійність; рівномірність

завантаження обладнання; загальну енергоефективність; якість кінцевої продукції; здатність системи адаптуватися до зміни умов виробництва; економічну ефективність функціонування системи.

Особливо важливою є системна надійність. Надійність окремої машини не визначає автоматично надійність усього машинного комплексу. Наприклад, вихід з ладу однієї машини може призвести до зупинки всієї технологічної лінії, якщо відсутнє резервне обладнання або можливість обходу несправної ділянки.

Тому підвищення системної надійності може здійснюватися за рахунок: резервування обладнання; синхронізації продуктивності машин; автоматичного контролю технічного стану; прогнозування відмов; своєчасного технічного обслуговування; оптимізації структури технологічної лінії; використання автоматизованих систем управління.

Управління якістю в агроінженерних системах також має ієрархічний характер.

На елементному рівні контролюється якість деталей і вузлів.

На рівні машини контролюється якість виконання окремої технологічної операції.

На рівні машинного комплексу оцінюється узгодженість роботи обладнання та стабільність технологічного процесу.

На рівні виробничо-технологічної системи оцінюється якість кінцевої продукції та загальна ефективність виробництва.

Отже, управління якістю повинно здійснюватися на всіх ієрархічних рівнях, оскільки дефект або відхилення, яке виникає на нижчому рівні, може призвести до погіршення характеристик системи вищого рівня.

Оптимізація агроінженерної системи полягає у визначенні таких параметрів її елементів і режимів роботи, за яких забезпечується найкраще співвідношення між якістю продукції, продуктивністю та витратами ресурсів.

На різних рівнях можуть оптимізуватися:

Елемент: розміри, матеріал, міцність, зносостійкість.

Машина: швидкість робочого органу, продуктивність, потужність приводу, технологічний режим.

Машинний комплекс: співвідношення продуктивностей машин, швидкість транспортних операцій, послідовність технологічних операцій, завантаження обладнання.

Виробничо-технологічна система: загальна продуктивність, енергоємність, матеріаломісткість, технологічні втрати, собівартість і якість продукції.

Важливо враховувати, що локальна оптимізація одного елемента не завжди забезпечує глобальну оптимізацію всієї системи. Наприклад, збільшення продуктивності окремої машини може призвести до перевантаження наступної технологічної операції, утворення заторів або зростання енерговитрат.

Тому основним завданням дисципліни «Управління якістю та оптимізація технологічних параметрів обладнання в агроінженерії» є формування системного підходу до вибору та регулювання параметрів обладнання з урахуванням взаємодії всіх рівнів агроінженерної системи.

Узагальнено процес можна представити як: параметри елементів → характеристики машин → узгодження машинного комплексу → параметри виробничої системи → якість продукції та ефективність виробництва.

Таким чином, ефективне управління агроінженерною системою потребує не лише вдосконалення окремих машин, а й оптимізації взаємодії між усіма рівнями системи, що забезпечує підвищення якості продукції, надійності обладнання, продуктивності та ресурсоенергоефективності виробництва.

3. Функціональні зв'язки між елементами системи

Функціональні зв'язки є основою взаємодії між окремими елементами, машинами, технологічними операціями та підсистемами агроінженерної системи. Саме характер і напрям цих зв'язків визначають спосіб функціонування системи, послідовність проходження матеріальних та інформаційних потоків, можливість

регулювання технологічних процесів і досягнення заданих показників якості.

Функціональні зв'язки в агроінженерній системі доцільно поділяти на матеріальні, енергетичні, інформаційні та організаційні.

1. Матеріальні зв'язки забезпечують переміщення та перетворення матеріальних потоків у процесі виробництва. До них належать потоки сировини, напівфабрикатів, готової продукції, відходів та технологічних матеріалів.

Наприклад, у технологічній лінії післязбиральної обробки зерна матеріальний потік проходить через приймальний пристрій, транспортери, зерноочисні машини, сушарку та обладнання для зберігання. Порушення узгодженості матеріального потоку може спричинити накопичення сировини перед окремою машиною, її недовантаження або перевантаження, що негативно впливає на продуктивність і якість технологічного процесу.

2. Енергетичні зв'язки характеризують передавання та використання електричної, теплової, механічної та інших видів енергії. Енергетичні потоки забезпечують роботу приводів, нагрівальних установок, вентиляторів, транспортних засобів та інших елементів технологічної системи.

Для сучасних агроінженерних систем важливим завданням є оптимізація енергетичних потоків. Це передбачає визначення таких режимів роботи обладнання, за яких необхідна якість продукції досягається при мінімальних питомих енерговитратах.

3. Інформаційні зв'язки забезпечують передавання інформації між окремими елементами системи та системою управління. До них належать сигнали від датчиків, результати вимірювань, команди керування, дані про стан обладнання, інформація про якість сировини та готової продукції.

Інформаційні зв'язки є особливо важливими для автоматизованих технологічних систем. Наприклад, датчики можуть контролювати температуру, вологість, тиск, швидкість руху матеріалу, навантаження електродвигуна або інші параметри. Отримана інформація надходить до системи управління, яка

порівнює фактичні значення із заданими та за необхідності формує керуючий сигнал.

4. Організаційні зв'язки визначають порядок взаємодії між персоналом, технологічними підрозділами та управлінськими структурами. Вони реалізуються через розпорядження, технологічні інструкції, регламенти, графіки роботи, плани технічного обслуговування та інші організаційні документи.

Організаційні зв'язки забезпечують узгодження дій операторів, інженерно-технічного персоналу та керівництва, а також визначають відповідальність за контроль технологічних параметрів, якість продукції та технічний стан обладнання.

Залежно від характеру взаємодії між елементами агроінженерна система може мати послідовну, паралельну, змішану структуру або структуру зі зворотним зв'язком.

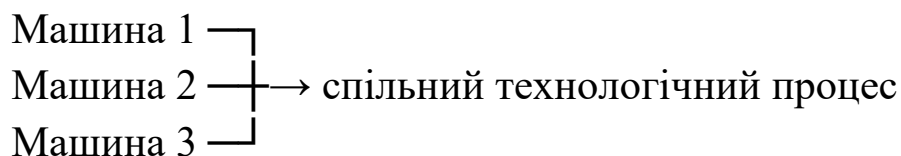
Послідовна структура передбачає послідовне проходження матеріального потоку через окремі технологічні операції:

Операція 1 → Операція 2 → Операція 3 → Операція 4 → Готова продукція.

Прикладом є послідовність операцій під час післязбиральної обробки зерна: приймання → очищення → сушіння → сортування → зберігання.

Перевагою такої структури є простота організації технологічного процесу, однак відмова одного ключового елемента може призвести до зупинки всієї системи.

Паралельна структура передбачає одночасне виконання окремих операцій або використання декількох однотипних машин.



Паралельна організація може застосовуватися для збільшення загальної продуктивності, забезпечення резервування та підвищення надійності системи.

Змішана структура поєднує послідовні та паралельні зв'язки. Вона є найбільш характерною для складних агропромислових

технологічних ліній, де окремі операції виконуються послідовно, а на інших ділянках використовуються паралельні машини або технологічні гілки.

Особливе значення для управління якістю має зворотний зв'язок. Він забезпечує передачу інформації про фактичний стан технологічного процесу до системи управління, після чого здійснюється коригування відповідних параметрів.

Принцип дії можна представити так: задане значення → система управління → обладнання → технологічний процес → контроль → фактичне значення → порівняння → коригування параметрів.

Наприклад, під час сушіння зерна необхідно підтримувати задану вологість готової продукції. Якщо система контролю виявляє, що вологість залишається вищою за встановлене значення, система управління може змінити температуру теплоносія, його витрату або тривалість сушіння. Таким чином, зворотний зв'язок перетворює систему з простої сукупності машин на керовану динамічну систему, здатну реагувати на зміни умов функціонування.

Види зворотних зв'язків.

Зворотний зв'язок може бути:

- ✓ негативним – спрямований на зменшення відхилення фактичного параметра від заданого значення;
- ✓ позитивним – підсилює зміни, що виникають у системі;
- ✓ локальним – охоплює окрему машину або технологічну операцію;
- ✓ системним – охоплює декілька машин або всю виробничо-технологічну систему.

У задачах управління якістю переважно використовується негативний зворотний зв'язок, оскільки його основне призначення – стабілізація технологічних параметрів та мінімізація відхилень від установлених значень.

Зворотні зв'язки дають змогу підтримувати необхідні показники якості навіть за умов зміни зовнішніх і внутрішніх факторів. В аграрному виробництві такими факторами можуть бути:

- ✓ зміна вологості та фізико-механічних властивостей сировини;
- ✓ температура та вологість навколишнього середовища;
- ✓ зміна стану ґрунту;
- ✓ нерівномірність надходження матеріалу;
- ✓ зношування робочих органів;
- ✓ зміна навантаження на обладнання;
- ✓ коливання напруги електромережі;
- ✓ зміна властивостей продукції під час технологічної обробки.

Наприклад, зміна вологості зерна впливає на режими його очищення та сушіння. Якщо технологічне обладнання працює за незмінних параметрів, зміна властивостей сировини може призвести до погіршення якості кінцевого продукту або збільшення енерговитрат. Використання системи автоматичного контролю дає можливість своєчасно змінити технологічний режим відповідно до фактичних умов.

У сучасних агроінженерних системах зворотний зв'язок використовується не лише для підтримання параметрів на заданому рівні, а й для їх оптимізації.

Система може визначати оптимальне значення параметра за певним критерієм, наприклад:

- максимальна продуктивність → при заданій якості продукції;
- мінімальні енерговитрати → при забезпеченні необхідної продуктивності;
- мінімальні втрати → при заданій якості технологічної операції.

Отже, оптимізація передбачає пошук такого режиму роботи обладнання, який забезпечує найкраще співвідношення між кількома критеріями.

Наприклад, збільшення швидкості робочого органу може підвищити продуктивність машини, але одночасно збільшити енерговитрати та механічне пошкодження продукції. Тому оптимальним буде не максимальне, а раціональне значення

швидкості, за якого забезпечуються необхідна продуктивність і якість при допустимих енерговитратах.

Таким чином, функціональні зв'язки визначають структуру, керованість та ефективність агроінженерної системи. Матеріальні та енергетичні зв'язки забезпечують функціонування технологічного процесу, інформаційні – його контроль і регулювання, а організаційні – координацію роботи персоналу та виробничих підрозділів. Наявність зворотних зв'язків забезпечує адаптивність системи до змінних умов, стабілізацію технологічних параметрів, підвищення якості продукції та створює основу для автоматизованої оптимізації роботи обладнання.

4. Показники ефективності функціонування систем

Ефективність виробничо-технологічної системи оцінюється комплексом показників: продуктивністю, питомими витратами ресурсів (енергії, палива, праці) на одиницю продукції, якістю кінцевої продукції, коефіцієнтом використання робочого часу та надійністю. Узагальнюючим показником часто слугує економічна ефективність – співвідношення отриманого результату до сукупних витрат на його досягнення.

Ефективність виробничо-технологічної системи є комплексною характеристикою, яка відображає здатність системи забезпечувати заданий обсяг і необхідну якість продукції при раціональному використанні технічних, енергетичних, матеріальних, трудових та фінансових ресурсів. Оцінювання ефективності дає змогу визначити сильні та слабкі сторони технологічної системи, виявити резерви підвищення продуктивності та обґрунтувати оптимальні режими роботи обладнання.

Ефективність виробничо-технологічної системи оцінюється комплексом взаємопов'язаних показників, до основних з яких належать продуктивність, якість продукції, питомі витрати ресурсів, використання робочого часу, надійність обладнання та економічна ефективність.

1. Продуктивність виробничо-технологічної системи

Продуктивність характеризує кількість продукції, виробленої системою за одиницю часу. Вона є одним із основних показників ефективності технологічного обладнання.

Продуктивність визначають за формулою:

$$Q = M / t,$$

де Q – продуктивність системи, т/год або кг/год;

M – кількість виробленої або обробленої продукції, т або кг;

t – тривалість роботи, год.

Фактична продуктивність залежить від конструктивних характеристик обладнання, режимів його роботи, властивостей сировини, організації матеріальних потоків та узгодженості окремих машин. Підвищення продуктивності не повинно здійснюватися за рахунок погіршення якості продукції або надмірного збільшення енерговитрат. Тому в сучасних агроінженерних системах важливим є пошук оптимального режиму, за якого забезпечується необхідна продуктивність при дотриманні встановлених показників якості.

2. Питомі витрати ресурсів

Важливим критерієм ефективності є кількість ресурсів, витрачених на виробництво одиниці продукції.

До основних ресурсів належать: електрична та теплова енергія; паливо; сировина і матеріали; трудові ресурси; вода; експлуатаційні матеріали. Наприклад, питомі енерговитрати визначаються як:

$$e = E / M,$$

де e – питомі енерговитрати, кВт·год/т або МДж/т;

E – загальна кількість спожитої енергії;

M – кількість виробленої або обробленої продукції.

Чим меншими є питомі витрати ресурсів за однакової продуктивності та якості продукції, тим ефективнішою вважається система. Оптимізація технологічних параметрів обладнання повинна бути спрямована на зниження питомих витрат ресурсів без погіршення якості технологічного процесу.

3. Якість кінцевої продукції

Якість продукції є одним із ключових критеріїв ефективності агроінженерної системи. Вона визначається сукупністю властивостей продукції, які забезпечують її відповідність встановленим нормативним, технологічним та споживчим вимогам.

Для сільськогосподарської продукції показниками якості можуть бути: вологість; чистота; вміст домішок; ступінь подрібнення; механічне пошкодження; схожість насіння; однорідність продукції; відповідність заданим фізико-механічним характеристикам. Якість безпосередньо залежить від технологічних параметрів обладнання. Наприклад, зміна швидкості робочого органу, температури, тривалості обробки або продуктивності може суттєво впливати на кінцеві характеристики продукції. Тому одним із основних завдань управління якістю є підтримання технологічних параметрів у допустимих або оптимальних межах.

4. Коефіцієнт використання робочого часу

Ефективність системи значною мірою залежить від того, наскільки повно використовується робочий час обладнання.

Коефіцієнт використання робочого часу можна визначити як:

$$K_r = T_r / T_z,$$

де K_r – коефіцієнт використання робочого часу;

T_r – фактичний час роботи обладнання;

T_z – загальний запланований або доступний час.

Втрати робочого часу можуть бути спричинені: технічними несправностями; плановим і аварійним ремонтом; відсутністю сировини; простоюванням транспортних засобів; переналагодженням обладнання; порушенням технологічної послідовності; несвоєчасним технічним обслуговуванням. Підвищення коефіцієнта використання робочого часу дає змогу збільшити фактичний випуск продукції без пропорційного збільшення кількості обладнання.

5. Надійність виробничо-технологічної системи

Надійність характеризує здатність обладнання та системи виконувати задані функції протягом визначеного часу за встановлених умов експлуатації.

Для оцінювання надійності використовують такі характеристики: безвідмовність; довговічність; ремонтпридатність; збережуваність; середній час безвідмовної роботи; частоту відмов; середній час відновлення працездатності.

Надійність має особливе значення для машинних комплексів, оскільки відмова одного ключового елемента може призвести до зупинки всієї технологічної лінії. Підвищення надійності забезпечується правильним вибором обладнання, своєчасним технічним обслуговуванням, діагностуванням технічного стану, резервуванням та оптимізацією режимів експлуатації.

6. Технологічні втрати

Окремим показником ефективності є рівень втрат сировини та готової продукції під час виконання технологічних операцій. До втрат можуть належати: механічні втрати; втрати під час транспортування; втрати під час очищення; втрати під час сушіння; втрати внаслідок перевантаження обладнання; втрати, пов'язані з недосконалістю технологічного процесу. Зниження технологічних втрат є важливим напрямом оптимізації, оскільки навіть невеликі втрати при значних обсягах виробництва можуть призводити до істотних економічних збитків.

7. Економічна ефективність

Узагальнюючим показником ефективності виробничо-технологічної системи часто виступає економічна ефективність, яка характеризує співвідношення отриманого результату та витрат на його досягнення. У загальному вигляді її можна представити як:

$$E_e = R / C,$$

де E_e – показник економічної ефективності; R – отриманий результат; C – сукупні витрати.

Результатом може бути вартість виробленої продукції, прибуток або економічний ефект від упровадження певного технічного чи технологічного рішення. До складу витрат можуть входити: витрати на сировину; витрати енергії та палива; заробітна плата; витрати на технічне обслуговування та ремонт; амортизаційні витрати; витрати на транспортування; інші

експлуатаційні витрати. Економічна ефективність дає змогу порівнювати альтернативні технологічні рішення та визначати доцільність модернізації або заміни обладнання.

8. Комплексна оцінка ефективності

Оскільки окремі показники можуть суперечити один одному, оцінювання виробничо-технологічної системи необхідно здійснювати комплексно.

Наприклад: збільшення продуктивності → може призвести до → збільшення енерговитрат;

збільшення швидкості робочого органу → може призвести до → зростання продуктивності, але одночасно до збільшення пошкодження продукції;

зменшення тривалості технологічної операції → може призвести до → зниження якості обробки.

Тому оптимальним вважається не максимальне значення одного показника, а раціональне поєднання кількох критеріїв.

У загальному випадку критерій оптимізації можна сформулювати як: максимізація продуктивності та якості при мінімізації витрат ресурсів і технологічних втрат.

Для цього можуть використовуватися багатокритеріальні методи оптимізації, економіко-математичне моделювання, статистичний аналіз експериментальних даних та автоматизовані системи управління.

9. Взаємозв'язок показників ефективності

Показники ефективності виробничо-технологічної системи взаємопов'язані. Зміна одного параметра може викликати зміни інших показників. Наприклад: технологічний параметр → режим роботи обладнання → продуктивність → якість продукції → витрати ресурсів → економічний результат.

Саме тому під час оптимізації необхідно враховувати системний характер взаємозв'язків. Таким чином, ефективність виробничо-технологічної системи в агроінженерії визначається не одним показником, а сукупністю характеристик, які відображають продуктивність, якість, ресурсо- та енергоефективність, надійність

і економічні результати. Комплексне оцінювання цих показників створює основу для обґрунтованого вибору технологічних режимів, удосконалення обладнання та прийняття рішень щодо оптимізації виробничого процесу.

5. Роль агроінженерії у формуванні виробничих систем

Агроінженерія забезпечує технічну реалізацію технологічних процесів аграрного виробництва: обґрунтування складу машинно-тракторного парку, проєктування та експлуатацію обладнання, впровадження систем автоматизованого контролю якості. Сучасний етап розвитку агроінженерії характеризується переходом від окремих технічних рішень до системного проєктування виробничо-технологічних комплексів з урахуванням критеріїв якості, енергоефективності та екологічної безпеки.

$$E = R / Z \quad (1)$$

де E - узагальнений показник ефективності системи; R – результат функціонування системи (обсяг або вартість виробленої продукції); Z – сукупні витрати ресурсів на досягнення цього результату.



Рисунок 1.1 – Ієрархія рівнів організації агроінженерної системи

Контрольні питання

1. Дайте визначення виробничо-технологічної системи та назвіть її основні складові.
2. Охарактеризуйте ієрархічні рівні організації агроінженерних систем.
3. Які типи функціональних зв'язків існують між елементами системи?
4. Назвіть основні показники ефективності функціонування виробничо-технологічної системи.
5. У чому полягає роль агроінженерії у формуванні сучасних виробничих систем?

ЛЕКЦІЯ 2. Теоретичні основи формування технологічних процесів у сільському господарстві

1. Поняття технологічного процесу та його структура
2. Етапи формування технологічних операцій
3. Взаємозв'язок біологічних і технічних процесів
4. Ресурсне забезпечення технологічних процесів
5. Критерії ефективності агротехнологій

Ключові слова: технологічний процес (*technological process*); операція (*operation*); ресурси (*resources*); агротехнології (*agrotechnologies*); ефективність (*efficiency*)

1. Поняття технологічного процесу та його структура

Технологічний процес – це послідовність цілеспрямованих дій (операцій), у результаті виконання яких вихідний предмет праці (сировина, посівний матеріал, ґрунт) набуває заданих властивостей або перетворюється на готову продукцію. Технологічний процес є центральною складовою виробничо-технологічної системи, оскільки саме в його межах здійснюється безпосереднє перетворення предмета праці. Основною метою технологічного процесу в агроінженерії є отримання необхідного результату із заданими показниками якості при раціональному використанні матеріальних, енергетичних і трудових ресурсів.

Наприклад, під час післязбиральної обробки зерна технологічний процес може включати очищення, сушіння, сортування та підготовку продукції до зберігання. Кожна операція змінює певні властивості зернового матеріалу та створює необхідні умови для виконання наступної операції.

Технологічна операція – завершена частина технологічного процесу, яка виконується на одному робочому місці або групі взаємопов'язаних робочих місць із використанням відповідного обладнання. Наприклад: очищення зерна; сушіння зерна; подрібнення кормів; змішування компонентів корму; внесення добрив; обробіток ґрунту.

Технологічний перехід – частина операції, яка характеризується незмінністю оброблюваного матеріалу, обладнання або технологічного режиму. Зміна одного з основних параметрів може означати перехід до іншого технологічного переходу.

Технологічний прийом – окрема завершена дія виконавця або машини в межах переходу, спрямована на досягнення певного проміжного результату.

Таким чином, структура може бути представлена у вигляді:

Технологічний процес → технологічні операції → технологічні переходи → технологічні прийоми.

Основні елементи технологічного процесу

Будь-який технологічний процес можна описати через такі складові:

предмет праці – матеріал або об'єкт, який піддається технологічному впливу;

засоби праці – машини, обладнання, робочі органи та інструменти;

технологічний вплив – механічний, тепловий, хімічний, фізичний або інший вплив на предмет праці;

технологічні параметри – кількісні характеристики режиму роботи;

результат операції – зміна властивостей предмета праці;

показники якості – характеристики, за якими оцінюється відповідність отриманого результату встановленим вимогам.

Технологічні параметри процесу. Кожна технологічна операція характеризується певним набором параметрів режиму виконання. Саме вони визначають інтенсивність технологічного впливу та значною мірою впливають на якість кінцевого результату.

До основних параметрів можуть належати: продуктивність обладнання; швидкість руху робочих органів; частота обертання; температура; вологість; тиск; тривалість технологічної операції; подача матеріалу; витрата повітря або теплоносія; потужність приводу; навантаження на робочі органи.

Для різних технологічних процесів набір параметрів буде різним. Наприклад, для сушіння зерна важливими є температура теплоносія, його витрата, тривалість сушіння та початкова вологість зерна. Для очищення зерна – продуктивність, швидкість повітряного потоку, частота коливань робочих органів, характеристики сит та навантаження машини. Для обробітку ґрунту – глибина обробітку, швидкість руху агрегату, ширина захвату, тяговий опір та вологість ґрунту.

Одним із центральних завдань дисципліни «Управління якістю та оптимізація технологічних параметрів обладнання в агроінженерії» є встановлення залежності між режимними параметрами обладнання та якістю технологічного результату.

Зміна технологічного параметра може мати як позитивний, так і негативний вплив. Наприклад, збільшення швидкості робочого органу може підвищити продуктивність машини, але одночасно спричинити: збільшення енерговитрат; підвищення механічного пошкодження продукції; зростання навантаження на обладнання; погіршення якості обробки; прискорення зношування робочих органів. Тому між технологічними параметрами та якістю продукції існує оптимальний діапазон значень, у межах якого система забезпечує необхідний результат.

Необхідно розрізняти поняття виробничого та технологічного процесів. Виробничий процес є ширшим поняттям. Він охоплює весь комплекс дій, необхідних для отримання продукції, включаючи основні, допоміжні та обслуговуючі процеси.

До них належать: основні технологічні операції; транспортування; навантаження та розвантаження; зберігання; технічне обслуговування обладнання; контроль якості; енергозабезпечення; організаційні операції.

Технологічний процес у традиційному розумінні охоплює безпосередні дії, спрямовані на зміну властивостей або стану предмета праці.

Схематично:

Виробничий процес = технологічний процес + допоміжні процеси + обслуговування + управління.

Особливості технологічних процесів в агроінженерії

В аграрному виробництві межі між технологічними, транспортними та обслуговуючими операціями часто є умовними. Це пов'язано з тим, що переміщення сировини та продукції безпосередньо впливає на якість і результати технологічної обробки.

Наприклад, транспортування зерна є формально допоміжною операцією, однак неправильний режим роботи транспортера може спричинити: пошкодження зерна; втрати продукції; нерівномірне надходження матеріалу; перевантаження наступної машини; простоювання технологічної лінії. Тому в агроінженерних системах необхідно розглядати технологічні та транспортно-логістичні операції у взаємозв'язку.

За характером протікання технологічні процеси можуть бути безперервними, періодичними та дискретними.

Безперервний процес характеризується постійним надходженням сировини та безперервним отриманням готової продукції. Прикладом може бути транспортування зерна конвеєром або безперервне сушіння в поточній зерносушарці.

Періодичний процес здійснюється окремими циклами. Наприклад, завантаження певної партії зерна, її обробка та подальше розвантаження.

Дискретний процес складається з окремих технологічних дій, які виконуються над конкретними об'єктами або партіями продукції.

Тип процесу впливає на вибір обладнання, систему управління та методи оптимізації.

Важливою характеристикою технологічного процесу є його стабільність, тобто здатність забезпечувати приблизно однакові результати при повторному виконанні операцій.

На стабільність можуть впливати: неоднорідність сировини; зміна температури та вологості навколишнього середовища; зношування робочих органів; зміна навантаження обладнання; нестабільність енергопостачання; помилки оператора; порушення

технологічних режимів. Для забезпечення стабільності застосовують автоматизований контроль, регулювання технологічних параметрів, технічну діагностику та системи зворотного зв'язку.

Оптимізація технологічного процесу полягає у визначенні таких значень технологічних параметрів, за яких досягається найкращий результат відповідно до встановленого критерію.

Основними критеріями оптимізації можуть бути: максимізація продуктивності; мінімізація питомих енерговитрат; мінімізація технологічних втрат; максимізація якості продукції; мінімізація собівартості виробництва.

На практиці найчастіше необхідно оптимізувати декілька показників одночасно. Наприклад, необхідно забезпечити максимальну продуктивність обладнання при одночасному збереженні заданої якості продукції та мінімізації енерговитрат.

Тому оптимальний технологічний режим можна визначити як такий режим роботи обладнання, за якого забезпечується необхідна якість продукції та продуктивність при мінімально можливих витратах ресурсів.

Контроль і управління технологічним процесом

Для підтримання оптимальних режимів використовують систему: вимірювання → аналіз → порівняння → коригування → контроль результату.

Датчики та контрольно-вимірювальні прилади визначають фактичні значення параметрів. Система управління порівнює їх із заданими або оптимальними значеннями та формує керуючий вплив на обладнання.

Таким чином, технологічний процес у сучасному агроінженерному виробництві є не статичною послідовністю операцій, а динамічною керованою системою, параметри якої можуть змінюватися залежно від стану сировини, обладнання та умов навколишнього середовища.

Отже, ефективне управління технологічним процесом передбачає не лише правильний вибір обладнання та послідовності

операцій, а й постійний контроль, регулювання та оптимізацію технологічних параметрів. Це забезпечує стабільну якість продукції, підвищення продуктивності обладнання, зниження енерго- та ресурсних витрат і підвищення загальної ефективності виробничо-технологічної системи.

2. Етапи формування технологічних операцій

Технологічна операція є основним структурним елементом технологічного процесу та являє собою завершену частину роботи, яка виконується над предметом праці з метою отримання певної зміни його властивостей, стану або форми. Формування технологічної операції передбачає послідовне визначення її мети, предмета технологічного впливу, способу виконання, режимних параметрів, технічних засобів та критеріїв оцінювання результату.

Загальну послідовність формування операції можна представити:

Мета операції → предмет праці → технологічний вплив → обладнання → режимні параметри → контроль → оцінка результату → коригування.

1. Визначення мети технологічної операції

Першим етапом є визначення того, яку саме зміну властивостей предмета праці необхідно отримати.

Метою операції може бути: зміна вологості матеріалу; очищення від домішок; подрібнення; сортування; змішування; ущільнення; переміщення; нагрівання або охолодження; зміна фізико-механічних властивостей; забезпечення необхідної якості посіву або обробітку ґрунту. Наприклад, метою сушіння зерна є зниження його вологості до рівня, який забезпечує можливість безпечного зберігання. При цьому необхідно не допустити перегрівання або пошкодження зерна. Чітке визначення мети дає можливість встановити кінцеві показники якості операції та вибрати відповідні технологічні засоби.

2. Визначення предмета праці та його властивостей

Після визначення мети необхідно оцінити властивості матеріалу або об'єкта, який піддається обробці.

В агроінженерії такими властивостями можуть бути: вологість; температура; розмір і форма частинок; щільність; міцність; сипкість; засміченість; фізико-механічні властивості; неоднорідність матеріалу.

Особливістю аграрного виробництва є значна варіативність властивостей сировини. Наприклад, вологість зерна може відрізнятися не тільки між різними партіями, а й у межах однієї партії. Тому технологічні режими повинні мати певний діапазон регулювання.

3. Визначення технологічних впливів

Наступним етапом є визначення характеру впливу, за допомогою якого досягається необхідна зміна властивостей предмета праці.

Основними видами технологічних впливів є:

Механічні – різання, подрібнення, перемішування, ущільнення, сепарація, транспортування.

Теплові – нагрівання, сушіння, охолодження, заморожування.

Хімічні – внесення добрив, засобів захисту рослин, реагентів та інших речовин.

Фізичні – вплив повітряного потоку, електромагнітного поля, вібрації, тиску тощо.

У багатьох технологічних процесах застосовується одночасно декілька видів впливу. Наприклад, під час сушіння зерна поєднуються тепловий і аеродинамічний впливи.

4. Вибір технологічного обладнання

Вибір машини або обладнання повинен здійснюватися відповідно до мети операції, властивостей предмета праці та необхідної продуктивності.

При виборі обладнання враховують: продуктивність; конструктивні характеристики; потужність приводу; діапазон регулювання; енергоємність; надійність; якість виконання операції; рівень автоматизації; безпечність експлуатації; можливість

інтеграції в технологічну лінію; витрати на експлуатацію та технічне обслуговування.

Обладнання повинно забезпечувати не тільки виконання технологічної операції, а й стабільність отримання заданого результату.

5. Визначення режимних параметрів

Одним із найважливіших етапів є визначення режимних параметрів, які характеризують умови функціонування обладнання.

До них можуть належати: швидкість руху; частота обертання; температура; тиск; тривалість операції; продуктивність; подача матеріалу; витрата повітря; потужність; вологість; глибина обробітку; навантаження на робочий орган.

Від правильності вибору режимних параметрів залежить продуктивність обладнання, якість продукції, рівень енерговитрат та надійність машини. Наприклад, збільшення продуктивності подачі зерна до очисної машини може підвищити загальну продуктивність, але за надмірного навантаження може знизитися ефективність очищення та збільшитися кількість втрат. Тому для кожної операції необхідно визначати допустимі та оптимальні значення параметрів.

6. Врахування агротехнічних вимог

Раціональне формування технологічної операції повинно відповідати агротехнічним вимогам, які визначають необхідні умови та якість виконання робіт.

До таких вимог можуть належати: оптимальні строки виконання; допустима глибина обробітку; допустимі відхилення параметрів; рівномірність обробки; мінімізація пошкодження продукції; забезпечення необхідної якості посіву; недопущення деградації ґрунту; дотримання вимог до якості кінцевої продукції. Наприклад, під час посіву важливими є глибина загортання насіння, рівномірність розподілу насіння та відстань між рослинами. Відхилення цих параметрів може безпосередньо впливати на майбутню врожайність.

7. Врахування ресурсних обмежень

Реальний технологічний процес завжди функціонує в умовах обмежених ресурсів. Тому під час формування операції необхідно враховувати: наявність машин і обладнання; доступну потужність енергетичних установок; кількість і кваліфікацію персоналу; наявність пального; доступність електроенергії; обсяг сировини; фінансові можливості підприємства; пропускну здатність транспортної системи.

Отже, теоретично найефективніша технологія не завжди є практично оптимальною. Оптимальне рішення повинно враховувати реальні виробничі умови та доступні ресурси.

8. Визначення критеріїв якості операції

Для оцінювання результату технологічної операції встановлюються критерії контролю якості.

Таблиця 2.1. Приклад критеріїв контролю якості

Технологічна операція	Основні показники якості
Очищення зерна	чистота, кількість домішок, втрати зерна
Сушіння	кінцева вологість, температура зерна, рівномірність сушіння
Подрібнення	розмір частинок, однорідність фракції
Посів	глибина загортання, рівномірність розподілу насіння
Обробіток ґрунту	глибина, рівномірність, ступінь кришення ґрунту
Транспортування	втрати, пошкодження продукції, продуктивність

Контроль може бути операційним, періодичним або безперервним. У сучасних системах дедалі ширше застосовуються датчики та автоматизовані системи моніторингу, які забезпечують оперативне отримання інформації про стан процесу.

9. Встановлення допустимих відхилень

Необхідною умовою управління якістю є визначення допустимих меж зміни технологічних параметрів.

Наприклад, якщо задана температура технологічного процесу становить певне значення, система управління повинна визначити допустимий діапазон її відхилення.

У загальному вигляді:

$$X_{\min} \leq X \leq X_{\max},$$

де X – фактичне значення технологічного параметра;

$X_{\min}$ – мінімально допустиме значення;

$X_{\max}$ – максимально допустиме значення.

Вихід параметра за встановлені межі може бути сигналом для коригування режиму роботи обладнання.

10. Оптимізація технологічної операції

Після визначення основних параметрів здійснюється їх оптимізація. Оптимальний режим повинен забезпечувати необхідну якість при раціональному використанні ресурсів.

Основними критеріями оптимізації можуть бути:

- ✓ максимальна продуктивність;
- ✓ мінімальні питомі енерговитрати;
- ✓ мінімальні втрати продукції;
- ✓ мінімальне пошкодження сировини;
- ✓ максимальна якість;
- ✓ мінімальна собівартість;
- ✓ максимальна надійність обладнання.

Наприклад, під час сушіння зерна необхідно знайти таке співвідношення температури, витрати теплоносія та тривалості процесу, за якого досягається необхідна кінцева вологість при мінімальних енерговитратах і без погіршення якості зерна.

11. Адаптація технологічної операції

В умовах аграрного виробництва технологічна операція повинна бути здатною адаптуватися до зміни умов.

Зміни можуть стосуватися: вологості сировини; температури навколишнього середовища; фізико-механічних властивостей матеріалу; стану ґрунту; навантаження на обладнання; технічного стану робочих органів.

Для цього використовують системи автоматичного регулювання, які змінюють технологічні параметри залежно від фактичного стану процесу. Таким чином, сучасна технологічна операція може розглядатися як керована та адаптивна система, в якій параметри не обов'язково залишаються постійними, а змінюються відповідно до умов функціонування.

Процес формування технологічної операції можна представити у вигляді:

Мета операції → аналіз предмета праці → вибір технологічного впливу → вибір обладнання → визначення параметрів → встановлення критеріїв якості → визначення ресурсних обмежень → оптимізація → контроль → коригування.

Отже, раціонально сформована технологічна операція повинна забезпечувати необхідну якість результату, задану продуктивність, мінімально можливі витрати ресурсів, надійність та безпечність роботи обладнання.

Для дисципліни «Управління якістю та оптимізація технологічних параметрів обладнання в агроінженерії» особливе значення має встановлення взаємозв'язку:

«технологічний параметр → режим роботи обладнання → результат операції → показник якості → ресурсні витрати → економічна ефективність».

Саме цей взаємозв'язок є основою для обґрунтування оптимальних режимів роботи агроінженерного обладнання та прийняття рішень щодо вдосконалення технологічних процесів.

3. Взаємозв'язок біологічних і технічних процесів

Специфіка агротехнологій полягає в тому, що технологічні процеси агропромислового виробництва здійснюються за безпосередньої взаємодії технічних засобів із біологічними об'єктами – рослинами, тваринами, насінням, зерном, кормами та ґрунтом. На відміну від багатьох промислових технологій, де предмет праці має переважно стабільні фізико-механічні властивості, в аграрному виробництві властивості біологічних

об'єктів змінюються залежно від фази розвитку, вологості, температури, сорту, фізіологічного стану та умов навколишнього середовища. Тому агроінженерна система повинна враховувати не тільки технічні параметри обладнання, а й біологічні закономірності розвитку об'єкта, на який здійснюється технологічний вплив.

У загальному вигляді взаємодію можна представити як:

Біологічний об'єкт → технологічні вимоги → технічний засіб → технологічний вплив → реакція біологічного об'єкта → результат → контроль якості.

Особливістю агротехнологій є те, що біологічний об'єкт не є пасивним матеріалом. Він реагує на технологічний вплив, причому характер цієї реакції може змінюватися залежно від умов середовища.

Наприклад, рослина реагує на: глибину загортання насіння; густоту посіву; температуру; вологість ґрунту; забезпеченість поживними речовинами; механічний вплив робочих органів; освітленість; строки виконання технологічних операцій.

У тваринництві результат технологічного впливу залежить від: складу та поживності корму; режиму годівлі; температури та вологості приміщення; якості води; режиму утримання; мікроклімату; рівня механізації та автоматизації процесів.

Таким чином, технологічний режим повинен бути адаптований до фізіологічних і біологічних потреб об'єкта. Технологічні параметри обладнання безпосередньо впливають на результат біологічного процесу. Наприклад, під час сівби недостатня глибина загортання насіння може спричинити його пересихання, а надмірна – затримку появи сходів або зниження польової схожості.

Під час механічного обробітку ґрунту надмірна швидкість руху агрегату або неправильна глибина обробітку можуть призвести до руйнування структури ґрунту, збільшення енерговитрат або погіршення умов для розвитку рослин.

Під час зберігання зерна температура та вологість повинні підтримуватися на рівні, який запобігає розвитку небажаних

біологічних процесів, самозігріванню та погіршенню якості продукції. Отже, технічно оптимальний режим не завжди є біологічно оптимальним.

Під час посіву сівалка може працювати з високою технічною точністю та заданою продуктивністю. Однак якщо глибина загортання насіння не відповідає типу ґрунту, його вологості та біологічним особливостям культури, очікуваний результат не буде отриманий.

Отже: висока технічна точність $\neq$ гарантована біологічна ефективність.

Для отримання необхідного результату необхідно оптимізувати параметри обладнання з урахуванням властивостей біологічного об'єкта. Біологічні об'єкти характеризуються значною мінливістю. Навіть однакові за конструкцією технологічні операції можуть давати різний результат залежно від умов їх виконання.

Наприклад, однакова машина для обробки ґрунту може працювати по-різному на сухому, вологому або ущільненому ґрунті. Відповідно, оптимальна швидкість руху, глибина обробки та необхідна потужність трактора також будуть різними.

Аналогічно, режими сушіння зерна повинні враховувати його початкову вологість, температуру, сортові характеристики та призначення продукції. Це означає, що технологічна система повинна мати можливість регулювання та адаптації параметрів відповідно до фактичних умов.

Під час оптимізації агротехнологій необхідно враховувати не тільки технічні та економічні обмеження, а й біологічні обмеження.

До них належать:

- ✓ допустима температура;
- ✓ допустима вологість;
- ✓ допустиме механічне навантаження;
- ✓ оптимальні строки виконання операцій;
- ✓ допустима глибина обробки;
- ✓ допустима інтенсивність технологічного впливу;
- ✓ фізіологічні потреби рослин і тварин;

✓ допустимий рівень пошкодження біологічного матеріалу.

Вихід за межі таких параметрів може призвести до негативних наслідків, навіть якщо обладнання функціонує технічно справно.

Управління якістю в агроінженерії повинно враховувати подвійну природу результату: технічну та біологічну.

Технічний аспект характеризує:

- ✓ точність виконання операції;
- ✓ продуктивність обладнання;
- ✓ стабільність режиму;
- ✓ енерговитрати;
- ✓ надійність машини.

Біологічний аспект характеризує:

- ✓ врожайність;
- ✓ схожість насіння;
- ✓ інтенсивність росту та розвитку рослин;
- ✓ продуктивність тварин;
- ✓ збереженість продукції;
- ✓ фізіологічний стан біологічного об'єкта.

Тому кінцевий критерій якості повинен враховувати результат взаємодії технічної системи та біологічного об'єкта.

У дисципліні «Управління якістю та оптимізація технологічних параметрів обладнання в агроінженерії» оптимізація повинна розглядатися як пошук такого режиму роботи обладнання, який забезпечує найкращий результат з урахуванням одночасно технічних, технологічних, біологічних, ресурсних та економічних факторів.

У загальному вигляді: Оптимальний режим = $f(\text{технологічні вимоги, біологічні потреби, технічні можливості, ресурси, економічні обмеження})$. Наприклад, збільшення швидкості руху агрегату може підвищити продуктивність і зменшити тривалість виконання робіт, але водночас погіршити якість операції. Тому оптимальним буде таке значення швидкості, за якого

забезпечується необхідна якість роботи при прийнятній продуктивності та витратах енергії.

Специфіка агропромислового виробництва зумовлює необхідність міждисциплінарного підходу до проєктування та управління технологічними процесами.

Такий підхід поєднує знання:

- ✓ агрономії – біологічні особливості рослин, вимоги культур до ґрунту, вологи, температури та умов вирощування;
- ✓ зоотехнії – фізіологічні потреби тварин, режими годівлі та утримання, вимоги до мікроклімату;
- ✓ агроінженерії – конструкція машин, механізмів та технологічного обладнання;
- ✓ автоматизації – контроль, регулювання та автоматичне управління технологічними параметрами;
- ✓ економіки – оцінювання витрат, собівартості та економічної ефективності;
- ✓ математики та моделювання – оптимізація технологічних режимів і прогнозування результатів.

Взаємодію цих напрямів можна представити як:

Біологічні вимоги + технічні можливості + технологічні параметри + ресурсні обмеження → оптимальний технологічний режим → якісний результат.

Через змінність природних і біологічних умов сучасні агроінженерні системи повинні бути адаптивними. Це означає здатність системи змінювати параметри роботи відповідно до поточного стану об'єкта та зовнішнього середовища.

Для цього застосовують:

- ✓ датчики вологості, температури та тиску;
- ✓ системи машинного зору;
- ✓ автоматизований контроль технологічних параметрів;
- ✓ системи позиціонування;
- ✓ автоматичне регулювання подачі матеріалу;
- ✓ системи диференційованого внесення ресурсів;
- ✓ інтелектуальні системи управління.

Наприклад, автоматична система може змінювати норму внесення добрив залежно від властивостей конкретної ділянки поля або регулювати режими сушіння залежно від фактичної вологості зерна. Таким чином, перехід від фіксованих технологічних режимів до адаптивного управління є одним із основних напрямів розвитку сучасної агроінженерії.

Отже, специфіка агротехнологій визначається тісною взаємодією технічних, технологічних і біологічних процесів. Технічна система повинна не просто забезпечувати виконання заданої операції, а створювати такі умови, які відповідають біологічним потребам об'єкта. Тому під час управління якістю та оптимізації технологічних параметрів необхідно оцінювати не лише продуктивність і енергоефективність обладнання, а й біологічний результат його роботи. Основний принцип можна сформулювати так: «Оптимальним є не той технологічний режим, який забезпечує максимальну продуктивність машини, а той, який забезпечує необхідний біологічний і технологічний результат за раціонального використання ресурсів». Саме цей принцип є основою сучасного системного підходу до управління якістю та оптимізації технологічних процесів в агроінженерії.

4. Ресурсне забезпечення технологічних процесів

Ресурсне забезпечення технологічного процесу охоплює матеріальні ресурси (насіння, добрива, корми, паливо-мастильні матеріали), технічні ресурси (машини, обладнання, запасні частини) та трудові ресурси (кваліфікований персонал). Дефіцит або нерациональне використання будь-якого виду ресурсу знижує загальну ефективність технологічного процесу навіть за технічно досконалого обладнання.

Ресурсне забезпечення технологічного процесу – це сукупність матеріальних, технічних, енергетичних, трудових, інформаційних і фінансових ресурсів, необхідних для стабільного та ефективного виконання технологічних операцій і отримання продукції із заданими показниками якості.

В агропромисловому виробництві ресурсне забезпечення має особливе значення, оскільки технологічні процеси характеризуються значною сезонністю, залежністю від природно-кліматичних умов та необхідністю виконання великого обсягу робіт у визначені агротехнічні строки.

У загальному вигляді ресурсне забезпечення можна представити як: Матеріальні ресурси + технічні ресурси + енергетичні ресурси + трудові ресурси + інформаційні ресурси + фінансові ресурси → функціонування технологічного процесу → готова продукція.

1. Матеріальні ресурси. До матеріальних ресурсів належать насіння, добрива, засоби захисту рослин, корми, сировина, паливо-мастильні матеріали, запасні та допоміжні матеріали. Їх кількість і якість безпосередньо впливають на кінцевий результат виробництва.

Наприклад, якість насіння визначає потенційну врожайність, а якість добрив і правильність їх внесення впливають на забезпеченість рослин поживними речовинами. У тваринництві якість кормів безпосередньо пов'язана з продуктивністю та фізіологічним станом тварин. Важливим завданням є не тільки забезпечення необхідної кількості матеріальних ресурсів, а й раціональне їх використання. Надмірне використання ресурсів збільшує собівартість продукції, а недостатнє може призвести до зниження її якості.

2. Технічні ресурси. Технічні ресурси включають: трактори; сільськогосподарські машини; технологічне обладнання; транспортні засоби; енергетичні установки; контрольно-вимірювальні прилади; засоби автоматизації; запасні частини; інструменти.

Технічні ресурси повинні відповідати характеру технологічного процесу, необхідній продуктивності та агротехнічним вимогам.

Особливе значення має узгодженість продуктивності машин. Наприклад, якщо продуктивність зернозбиральної техніки значно перевищує пропускну здатність транспортної системи, виникають простої та втрати робочого часу. Якщо ж транспортна система має більшу продуктивність, частина її потенціалу залишається невикористаною. Отже, ефективне використання технічних ресурсів передбачає не максимальне завантаження окремої машини, а оптимальне завантаження всієї технологічної системи.

3. Енергетичні ресурси. До енергетичних ресурсів належать: електрична енергія; дизельне паливо; бензин; газ; теплова енергія; енергія відновлюваних джерел. Енергетичне забезпечення повинно бути достатнім для стабільної роботи обладнання, але водночас витрати енергії необхідно мінімізувати. Для оцінювання ефективності використовують показник питомих енерговитрат, який визначає кількість енергії, витраченої на виробництво або обробку одиниці продукції:

$$e = E / M,$$

де e – питомі енерговитрати;

E – загальні витрати енергії;

M – кількість виробленої або обробленої продукції.

Зниження питомих енерговитрат без погіршення якості продукції є одним із основних завдань оптимізації технологічних параметрів.

4. Трудові ресурси. Трудові ресурси представлені операторами машин, механізаторами, інженерами, технологами, операторами автоматизованих систем та іншими працівниками. Кваліфікація персоналу безпосередньо впливає на якість виконання технологічних операцій. Навіть сучасне автоматизоване обладнання може працювати неефективно при неправильному налаштуванні, порушенні режимів експлуатації або несвоєчасному технічному обслуговуванні.

Тому важливими складовими ресурсного забезпечення є: професійна підготовка персоналу; інструктаж; підвищення

кваліфікації; дотримання технологічних регламентів; контроль виконання операцій; дотримання вимог безпеки праці.

5. Інформаційні ресурси. У сучасних агроінженерних системах важливу роль відіграють інформаційні ресурси. До них належать: дані про стан сировини; технологічні параметри; інформація про технічний стан обладнання; результати контролю якості; дані про витрати ресурсів; метеорологічна інформація; цифрові карти полів; технологічні нормативи та регламенти. Інформація необхідна для прийняття рішень щодо вибору технологічних режимів та оперативного коригування роботи обладнання. Наприклад, інформація про вологість зерна дає змогу визначити необхідний режим сушіння, а дані про вологість ґрунту можуть використовуватися для вибору оптимального режиму його обробітку.

6. Фінансові ресурси. Фінансові ресурси визначають можливість придбання, модернізації та технічного обслуговування обладнання, закупівлі матеріалів і впровадження сучасних технологій. Під час вибору технологічного рішення необхідно враховувати не лише початкову вартість обладнання, а й сукупні витрати протягом усього періоду його експлуатації. Наприклад, дорожче енергоефективне обладнання може бути економічно вигіднішим за дешевше обладнання, якщо воно має нижчі експлуатаційні витрати та більшу продуктивність.

7. Взаємозв'язок ресурсів. Ресурси технологічного процесу є взаємозалежними. Зміна одного виду ресурсу може впливати на потребу в інших.

Наприклад: підвищення продуктивності обладнання → збільшення потреби в енергії → збільшення потреби в сировині → зміна навантаження на транспортну систему → зміна потреби в трудових ресурсах. Тому ресурсне забезпечення необхідно розглядати системно, а не як сукупність незалежних ресурсів.

8. Ресурсні обмеження. Реальні технологічні процеси завжди функціонують за певних обмежень. До них належать:

1. обмежена кількість техніки;

2. недостатня потужність енергетичного обладнання;
3. обмежені запаси пального;
4. нестача кваліфікованого персоналу;
5. обмежені фінансові ресурси;
6. обмежені строки виконання робіт;
7. недостатня пропускна здатність транспортної системи.

Ресурсні обмеження необхідно враховувати під час оптимізації технологічного процесу.

Наприклад, теоретично можна збільшити продуктивність технологічної лінії, але якщо транспортна система не здатна забезпечити необхідний потік сировини, фактичного підвищення ефективності не відбудеться.

9. Рациональне використання ресурсів. Рациональне використання ресурсів передбачає отримання максимального технологічного результату за мінімальних витрат. Основними напрямками ресурсозбереження є:

- ✓ оптимізація режимів роботи обладнання;
- ✓ автоматичне регулювання технологічних параметрів;
- ✓ зменшення простоїв;
- ✓ своєчасне технічне обслуговування;
- ✓ зниження технологічних втрат;
- ✓ повторне використання вторинних ресурсів;
- ✓ застосування енергоефективного обладнання;
- ✓ оптимізація логістики матеріальних потоків.

Важливо розуміти, що ресурсозбереження не означає просте зменшення кількості використаних ресурсів. Надмірне скорочення витрат може негативно вплинути на якість продукції. Тому завдання полягає у визначенні оптимального рівня ресурсних витрат.

10. Ресурсне забезпечення та управління якістю. Між ресурсним забезпеченням і якістю продукції існує безпосередній зв'язок.

Якість ресурсів → технологічний режим → якість виконання операції → якість готової продукції.

Недостатня або нестабільна якість сировини може вимагати коригування режимів роботи обладнання. Наприклад, зміна

вологості зерна може потребувати зміни температури та тривалості сушіння. Тому система управління якістю повинна контролювати не лише кінцеву продукцію, а й якість ресурсів на вході технологічного процесу.

11. Оптимізація ресурсного забезпечення. Оптимізація ресурсного забезпечення передбачає визначення такого складу та обсягу ресурсів, який забезпечує заданий результат виробництва при мінімальних витратах. У загальному вигляді завдання можна сформулювати як:

мінімізація витрат ресурсів $\rightarrow$ за умови забезпечення заданої продуктивності та якості продукції.

При цьому необхідно враховувати взаємозалежність ресурсів та обмеження виробничої системи. Наприклад, використання більш продуктивного обладнання може скоротити тривалість технологічного процесу, але збільшити потребу в енергії. Тому економічно доцільним буде не обов'язково обладнання з максимальною продуктивністю, а те, яке забезпечує оптимальне співвідношення продуктивності, енерговитрат, якості та вартості експлуатації.

5. Критерії ефективності агротехнологій

Ефективність агротехнології оцінюється за такими критеріями: агрономічна ефективність (урожайність, якість продукції), економічна ефективність (собівартість, рентабельність), енергетична ефективність (питомі витрати енергії на одиницю продукції) та екологічна ефективність (вплив на ґрунт, водні ресурси, біорізноманіття). Комплексне врахування цих критеріїв є основою сталого розвитку аграрного виробництва.

$$K_e = W_p / (W_1 + W_2 + \dots + W_n) \quad (1)$$

де K_e - коефіцієнт ефективності використання ресурсів технологічного процесу; W_p – обсяг отриманої продукції; $W_1 \dots W_n$ – витрати окремих видів ресурсів, приведені до єдиних одиниць виміру (наприклад, у грошовому чи енергетичному еквіваленті).

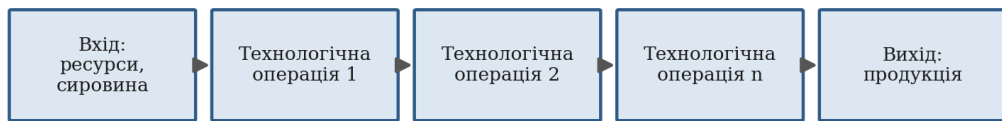


Рисунок 3.1 – Загальна структура технологічного процесу як послідовності операцій

Контрольні питання

1. Дайте визначення технологічного процесу та охарактеризуйте його структурні елементи.
2. Які етапи включає формування технологічної операції?
3. У чому проявляється взаємозв'язок біологічних і технічних процесів в агротехнологіях?
4. Які види ресурсів забезпечують виконання технологічного процесу?
5. Назвіть критерії оцінювання ефективності агротехнологій.

ЛЕКЦІЯ 3. Системний підхід до аналізу виробничих процесів та характеристика технологічних систем аграрного виробництва

1. Основи системного аналізу
2. Вхідні та вихідні параметри системи
3. Зворотні зв'язки в технологічних системах
4. Декомпозиція складних виробничих процесів
5. Методи оцінювання ефективності систем
6. Ознаки класифікації технологічних систем
7. Типи систем у рослинництві, механізовані та автоматизовані системи
8. Параметри оцінки систем та вплив зовнішніх умов

Ключові слова: класифікація (*classification*); технологічна система (*technological system*); механізація (*mechanization*); параметри (*parameters*); середовище (*environment*), системний підхід (*system approach*); аналіз (*analysis*); зворотний зв'язок (*feedback*); параметри (*parameters*); модель (*model*)

1. Основи системного аналізу

Системний аналіз – це методологія дослідження складних об'єктів (систем), що ґрунтується на розгляді об'єкта як єдиного цілого із взаємопов'язаними елементами, а не як сукупності незалежних частин. Основними принципами системного аналізу є: цілісність (властивості системи не зводяться до суми властивостей елементів), ієрархічність (система складається з підсистем різних рівнів), структурність (поведінка системи визначається її структурою) та взаємозалежність системи й середовища.

На відміну від традиційного підходу, за якого окремі елементи системи можуть розглядатися незалежно один від одного, системний аналіз передбачає вивчення структури, функцій, взаємозв'язків, потоків ресурсів, інформації та результатів функціонування всієї системи. В агроінженерії системний аналіз застосовується для дослідження технологічних ліній, машинних комплексів, виробничих підприємств, систем механізації, автоматизованих систем управління та технологічних процесів вирощування,

збирання, транспортування, переробки та зберігання сільськогосподарської продукції. Основною метою системного аналізу є визначення закономірностей функціонування системи та пошук найкращого рішення для досягнення поставленої мети за заданих обмежень.

У межах дисципліни «Управління якістю та оптимізація технологічних параметрів обладнання в агроінженерії» системний аналіз дає можливість:

- ✓ визначити основні елементи технологічної системи;
- ✓ встановити взаємозв'язки між ними;
- ✓ визначити фактори, які впливають на якість продукції;
- ✓ оцінити вплив технологічних параметрів на результат;
- ✓ виявити вузькі місця виробничого процесу;
- ✓ визначити резерви підвищення ефективності;
- ✓ обґрунтувати оптимальні режими роботи обладнання;
- ✓ оцінити наслідки зміни окремих параметрів для всієї системи.

Основні принципи системного аналізу

1. Принцип цілісності. Цілісність означає, що система має властивості, які не можуть бути пояснені простою сумою властивостей її окремих елементів. Наприклад, окремі машини зерноочисної лінії можуть мати високу продуктивність і надійність. Проте неправильне узгодження їхньої продуктивності може призвести до перевантаження однієї машини та простоювання іншої. Отже, ефективність технологічної лінії визначається не тільки характеристиками окремих машин, а й узгодженістю їх роботи. Це явище називають емерджентністю – виникненням нових властивостей системи в результаті взаємодії її елементів.

2. Принцип ієрархічності. Виробничо-технологічна система складається з підсистем різних рівнів. В агроінженерії можна виділити таку ієрархію:

деталь → вузол → машина → машинний агрегат → машинний комплекс → технологічна лінія → виробничо-технологічна система підприємства.

Кожен рівень має власні характеристики, але водночас залежить від функціонування рівнів нижчого та вищого порядку. Наприклад, надійність окремої деталі впливає на надійність машини, надійність машини – на роботу машинного комплексу, а робота комплексу – на ефективність усього виробничого процесу.

3. Принцип структурності

Структура системи визначається складом її елементів та характером зв'язків між ними. Однаковий набір машин може забезпечувати різні результати залежно від способу їхнього поєднання.

Структура може бути: послідовною; паралельною; змішаною; ієрархічною; із замкненими контурами управління; із резервуванням окремих елементів. Правильне формування структури технологічної системи дає змогу скоротити транспортні переміщення, зменшити кількість перевантажень, уникнути простоїв та підвищити загальну продуктивність.

4. Принцип взаємозалежності системи та середовища. Жодна агроінженерна система не функціонує ізольовано від зовнішнього середовища. На її роботу впливають: погодні умови; температура; вологість; стан ґрунту; властивості сировини; енергопостачання; ринкові умови; доступність матеріальних ресурсів; кваліфікація персоналу. Наприклад, зміна вологості зерна впливає на режими роботи очисного та сушильного обладнання. Зміна вологості ґрунту впливає на тяговий опір, необхідну потужність та якість обробітку. Тому технологічна система повинна мати можливість адаптуватися до змін зовнішнього середовища.

Для проведення системного аналізу необхідно визначити:

Мету системи – який результат необхідно отримати.

Об'єкт дослідження – технологічний процес, машина, комплекс або підприємство.

Елементи системи – машини, обладнання, персонал, ресурси.

Зв'язки між елементами – матеріальні, енергетичні, інформаційні та організаційні.

Вхідні параметри – сировина, енергія, інформація.

Керовані параметри – швидкість, температура, подача, тиск тощо.

Вихідні показники – продуктивність, якість, витрати ресурсів.

Зовнішні фактори – природні, економічні та організаційні умови.

Обмеження – ресурсні, технічні, технологічні та нормативні.

У спрощеному вигляді систему можна представити:

Вхід → технологічна система → вихід

де:

вхід – сировина, енергія, інформація та ресурси;

система – обладнання, технологічні операції, персонал та управління;

вихід – готова продукція, її якість, продуктивність та економічний результат.

Одним із важливих завдань системного аналізу є встановлення залежності між вхідними та вихідними параметрами.

Наприклад: вологість зерна + температура сушіння + витрата теплоносія + тривалість → кінцева вологість + якість зерна + енерговитрати.

Або для обробітку ґрунту:

вологість ґрунту + швидкість агрегату + глибина обробітку + тип робочого органу → якість обробітку + продуктивність + витрати палива.

Такі залежності є основою для подальшої оптимізації технологічного процесу.

Системний підхід дозволяє визначити вузькі місця – елементи або операції, які обмежують продуктивність усієї системи. Наприклад, якщо одна машина технологічної лінії має продуктивність 10 т/год, а інші – 15 т/год, то саме вона може стати обмежувальним елементом системи. Збільшення продуктивності інших машин у такому випадку не забезпечить пропорційного збільшення продуктивності всієї лінії. Тому одним із завдань оптимізації є усунення або зменшення впливу таких обмежень.

Системний аналіз дозволяє перейти від контролю тільки кінцевої продукції до управління якістю всього технологічного процесу. Для цього аналізуються:

вхідні ресурси → технологічні операції → режими роботи → проміжні результати → кінцева продукція.

Якщо якість кінцевої продукції не відповідає вимогам, системний підхід передбачає пошук причини не лише на останній операції, а на всіх попередніх етапах.

Наприклад, низька якість очищення зерна може бути пов'язана не тільки з несправністю очисної машини, а й із:

- ✓ неправильним регулюванням подачі;
- ✓ надмірною продуктивністю;
- ✓ неправильним налаштуванням сит;
- ✓ недостатньою швидкістю повітряного потоку;
- ✓ нерівномірністю надходження матеріалу.

Важливою складовою сучасної технологічної системи є зворотний зв'язок. Він забезпечує передачу інформації про фактичний стан системи до органу управління.

Загальна схема:

вимірювання → порівняння із заданим значенням → визначення відхилення → керуючий вплив → зміна параметра → контроль результату.

Наприклад, датчик визначає підвищення вологості зерна на виході сушарки. Система управління може автоматично змінити температуру або тривалість сушіння. Таким чином, зворотний зв'язок забезпечує стабільність і адаптивність технологічного процесу.

Практичне застосування системного аналізу можна здійснювати за такою послідовністю:

1. Формулювання проблеми.
2. Визначення мети системи.
3. Визначення меж системи.
4. Виділення основних елементів і підсистем.
5. Визначення взаємозв'язків між елементами.

6. Визначення вхідних і вихідних параметрів.
7. Визначення факторів зовнішнього середовища.
8. Визначення обмежень та критеріїв ефективності.
9. Аналіз можливих варіантів функціонування.
10. Вибір оптимального рішення.
11. Перевірка результату та коригування системи.
12. Системний аналіз та оптимізація

Системний аналіз є основою для постановки задачі оптимізації. Спочатку необхідно визначити, що саме оптимізується, які параметри можна змінювати та які обмеження існують.

Наприклад, завдання може полягати у: максимізації продуктивності за умов: заданої якості продукції; обмеженої потужності; допустимих енерговитрат; допустимого рівня втрат; обмеженої кількості ресурсів.

Або: мінімізації енерговитрат за умови: забезпечення заданої продуктивності; відповідності продукції нормативним вимогам; збереження надійності обладнання. Таким чином, системний аналіз дозволяє визначити компроміс між суперечливими критеріями.

Застосування системного аналізу дає можливість: підвищити продуктивність технологічних ліній; зменшити енерговитрати; скоротити втрати сільськогосподарської продукції; підвищити стабільність якості; оптимізувати режими роботи машин; підвищити надійність обладнання; скоротити простої; раціональніше використовувати ресурси; обґрунтовано модернізувати технологічні системи; впроваджувати автоматизовані системи управління.

2. Вхідні та вихідні параметри системи

Будь-яка технологічна система описується трьома групами параметрів: вхідними (керовані та некеровані фактори, що надходять до системи – сировина, енергія, керуючі впливи), внутрішніми (параметри стану самої системи – технічний стан обладнання, режими роботи) та вихідними (результати функціонування системи – обсяг і якість продукції, показники надійності). Аналіз системи передбачає встановлення кількісних залежностей вихідних параметрів від вхідних та внутрішніх.

У загальному вигляді функціонування технологічної системи можна представити:

Вхідні параметри → технологічна система → вихідні параметри

при цьому на результат впливають не тільки характеристики вхідних потоків, а й внутрішній стан системи та режими її функціонування.

У математичному вигляді залежність можна записати:

$$Y = f(X, Z),$$

де Y – вихідні параметри системи;

X – вхідні параметри;

Z – внутрішні параметри та параметри стану системи.

Така модель є основою для подальшого аналізу, прогнозування та оптимізації технологічних процесів.

1. Вхідні параметри технологічної системи

Вхідні параметри характеризують усе, що надходить до технологічної системи та впливає на її функціонування. До них належать: сировина; насіння; зерно; корми; ґрунт; вода; паливо; електрична та теплова енергія; інформація; керуючі сигнали; технологічні завдання.

Вхідні фактори можуть бути керованими та некерованими. Керовані вхідні фактори - це параметри, значення яких можна цілеспрямовано змінювати в процесі управління. Наприклад: подача сировини; швидкість руху агрегату; температура теплоносія; витрата повітря; частота обертання робочого органу; тиск; тривалість операції. Зміна цих параметрів дозволяє впливати на хід технологічного процесу та його кінцевий результат.

Некеровані фактори - це фактори, які безпосередньо не можуть бути змінені оператором або системою управління, але їхній вплив необхідно враховувати. До них належать: природно-кліматичні умови; температура навколишнього середовища; вологість сировини; властивості ґрунту; біологічні особливості рослин; неоднорідність продукції; випадкові зміни умов виробництва. Наприклад, оператор не може безпосередньо змінити початкову

вологість зерна, але може відповідно до неї змінити температуру та тривалість сушіння.

2. Внутрішні параметри системи. Внутрішні параметри характеризують стан самої технологічної системи та процеси, які відбуваються всередині неї.

До них належать: технічний стан обладнання; ступінь зношування робочих органів; навантаження на привід; температура вузлів; частота обертання; внутрішній тиск; продуктивність; стан робочих поверхонь; встановлені режими роботи; положення регулювальних механізмів.

Внутрішні параметри мають особливе значення, оскільки однакові вхідні умови можуть давати різні результати залежно від технічного стану обладнання. Наприклад, дві однакові зерноочисні машини можуть мати різну якість очищення за однакової подачі зерна, якщо одна з них має зношені робочі органи або неправильно налаштовані робочі елементи.

3. Вихідні параметри системи. Вихідні параметри характеризують результат функціонування технологічної системи. До основних вихідних параметрів належать: кількість виробленої продукції; продуктивність; якість продукції; технологічні втрати; питомі витрати енергії; витрати палива; рівень пошкодження продукції; надійність; собівартість; економічний результат. Особливе значення мають показники якості та продуктивності, оскільки саме вони характеризують ступінь досягнення мети технологічного процесу.

4. Класифікація параметрів за можливістю управління. Для задач оптимізації доцільно розділяти параметри на: керовані – можуть змінюватися системою управління; некеровані – задаються зовнішнім середовищем; контрольовані – можуть бути виміряні; неконтрольовані – їх значення важко або неможливо безпосередньо виміряти; оптимізовані – параметри, значення яких необхідно визначити для досягнення найкращого результату.

Наприклад, у процесі сушіння зерна: температура теплоносія – керований параметр; витрата теплоносія – керований параметр;

початкова вологість зерна – зовнішній фактор; кінцева вологість – контрольований вихідний параметр; питомі енерговитрати – критерій оптимізації.

5. Взаємозв'язок між параметрами

Між усіма групами параметрів існують причинно-наслідкові зв'язки. Наприклад:

початкова вологість зерна → температура сушіння + витрата теплоносія → тривалість сушіння → кінцева вологість → якість зерна + енерговитрати.

Інший приклад: вологість ґрунту + швидкість руху агрегату + глибина обробітку → навантаження на робочі органи → витрати палива → якість обробітку ґрунту.

Тому зміна одного параметра може спричинити зміну одразу декількох вихідних характеристик.

6. Математичний опис технологічної системи

Для дослідження взаємозв'язків між параметрами використовують математичні моделі. У найпростішому випадку залежність вихідного параметра від вхідного може бути представлена: $y = f(x)$.

Якщо результат залежить від декількох факторів:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Наприклад, продуктивність машини може залежати від подачі матеріалу, швидкості робочого органу, вологості сировини та технічного стану обладнання:

$$Q = f(q, n, W, S),$$

де Q – продуктивність; q – подача матеріалу; n – частота обертання; W – вологість сировини; S – технічний стан машини.

Такі залежності можуть визначатися експериментально, за допомогою статистичного аналізу, математичного моделювання або на основі теоретичних закономірностей.

7. Параметри стану технологічної системи

Особливе місце займають параметри стану, які характеризують поточний стан обладнання та процесу.

Наприклад: температура підшипникового вузла; рівень вібрації; споживана потужність; навантаження електродвигуна; тиск у гідравлічній системі; ступінь зношування робочих органів.

Контроль таких параметрів дає змогу своєчасно виявити відхилення та запобігти аварійним ситуаціям. У сучасних системах параметри стану контролюються за допомогою датчиків, систем моніторингу та автоматизованих засобів діагностування.

8. Параметри та управління якістю

Управління якістю передбачає встановлення залежності між технологічними параметрами та показниками якості продукції. Наприклад: швидкість руху агрегату → якість обробітку ґрунту; частота обертання робочого органу → ступінь подрібнення; температура сушіння → кінцева вологість та якість зерна; швидкість повітряного потоку → ефективність очищення зерна.

Якщо фактичне значення вихідного параметра відхиляється від заданого, необхідно визначити причину та скоригувати відповідні керовані параметри.

9. Зворотний зв'язок між параметрами

У системах автоматичного управління використовується зворотний зв'язок, який забезпечує постійне порівняння фактичного та заданого стану системи.

Схема має вигляд: задане значення → порівняння → технологічна система → результат → вимірювання → зворотний зв'язок → коригування.

Наприклад, якщо датчик визначає, що вологість зерна після сушіння перевищує задане значення, система може автоматично збільшити тривалість сушіння або змінити температуру та витрату теплоносія. Завдяки цьому технологічний процес стає керованим та адаптивним.

10. Аналіз чутливості. Для визначення значущості окремих параметрів застосовують аналіз чутливості. Він дозволяє встановити, наскільки сильно зміна певного вхідного або внутрішнього параметра впливає на вихідний результат. Якщо невелика зміна параметра викликає значну зміну якості або

продуктивності, такий параметр є високочутливим і потребує особливо точного контролю.

Наприклад, у процесі сушіння температура може суттєво впливати на якість зерна. Тому її необхідно підтримувати у встановленому діапазоні. Аналіз чутливості дозволяє визначити найважливіші фактори, на яких слід зосередити систему контролю та оптимізації.

11. Оптимізація параметрів технологічної системи. На основі встановлених залежностей здійснюється оптимізація. Задача може полягати в пошуку таких значень керованих параметрів X , які забезпечують найкраще значення критерію Y :

$Y \rightarrow \max$ або $Y \rightarrow \min$ за встановлених обмежень.

Наприклад: максимізувати продуктивність за умови: забезпечення заданої якості; допустимого рівня енерговитрат; відсутності перевантаження обладнання; допустимого рівня втрат.

Або: мінімізувати енерговитрати за умови: необхідної продуктивності; заданої якості продукції; дотримання технологічних вимог.

12. Значення параметричного аналізу для агроінженерії

Аналіз параметрів технологічної системи дозволяє: визначати причини погіршення якості продукції; прогнозувати результати технологічних операцій; визначати критичні параметри; оптимізувати режими роботи обладнання; зменшувати енерговитрати; скорочувати технологічні втрати; підвищувати продуктивність; своєчасно виявляти несправності; забезпечувати стабільність технологічного процесу; автоматизувати управління.

Таким чином, параметричний опис є основою для переходу від простого спостереження за технологічним процесом до кількісного управління ним.

Отже, технологічна система характеризується сукупністю вхідних, внутрішніх та вихідних параметрів, між якими існують причинно-наслідкові зв'язки. Вхідні параметри визначають умови функціонування системи, внутрішні – її поточний стан та режими роботи, а вихідні – результати функціонування. Основне завдання

системного аналізу полягає у встановленні залежності: вхідні параметри + внутрішній стан → технологічний процес → вихідні параметри.

Встановлення таких залежностей створює основу для контролю, прогнозування, управління якістю та оптимізації технологічних параметрів обладнання. Для агроінженерії особливо важливим є врахування змінності вхідних факторів, технічного стану обладнання та біологічних властивостей об'єкта. Саме тому сучасні технологічні системи повинні забезпечувати моніторинг параметрів, автоматичне регулювання та адаптацію режимів роботи до поточних умов виробництва.

3. Зворотні зв'язки в технологічних системах та декомпозиція складних виробничих процесів

Зворотний зв'язок – це канал передачі інформації про стан вихідних параметрів системи назад до її входу з метою коригування режиму роботи. Розрізняють негативний зворотний зв'язок (спрямований на стабілізацію процесу, зменшення відхилення від заданого значення) та позитивний (підсилює відхилення, що може призводити до нестабільності системи). У системах управління якістю переважно застосовують негативний зворотний зв'язок для утримання технологічних параметрів у межах допустимих відхилень.

Декомпозиція – це метод розчленування складного виробничого процесу на простіші підпроцеси (підсистеми), що піддаються окремому аналізу та моделюванню. Декомпозиція здійснюється за функціональною, часовою або просторовою ознакою і дає змогу локалізувати джерела відхилень від нормативних показників якості на рівні окремих операцій, а не всього процесу в цілому.

4. Методи оцінювання ефективності систем

До основних методів оцінювання ефективності систем належать: метод прямого розрахунку показників (продуктивність, собівартість), метод порівняльного аналізу (з еталонним або конкурентним варіантом), метод експертних оцінок (за

багатокритеріальними шкалами) та методи математичного моделювання, що дають змогу прогнозувати поведінку системи за різних сценаріїв вхідних параметрів без проведення натурних експериментів.

$$Y = F(X, S) \quad (1)$$

Це загальний вигляд системної залежності; Y – вектор вихідних параметрів системи; X – вектор вхідних параметрів; S – вектор параметрів стану (структури) системи; F – оператор перетворення, що описує функціонування системи.

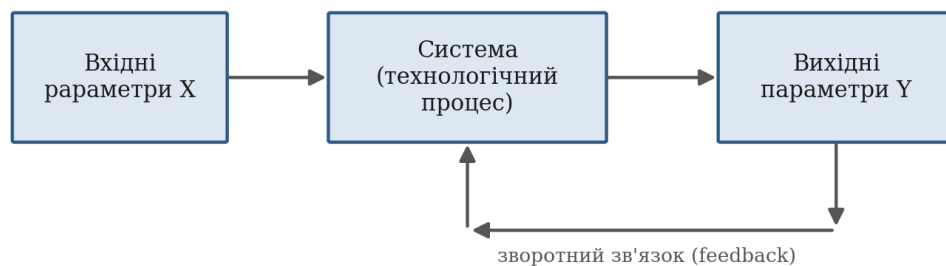


Рисунок 3.1 – Схема системи з негативним зворотним зв'язком

Технологічні системи аграрного виробництва класифікують за низкою ознак: за галуззю застосування (рослинництво, тваринництво, переробка продукції), за ступенем механізації (ручні, механізовані, автоматизовані), за характером технологічного процесу (неперервні, дискретні, циклічні), за рівнем складності (прості, комплексні) та за призначенням (основні, допоміжні, обслуговуючі).

5. Типи систем у рослинництві та механізовані та автоматизовані системи

У рослинництві виділяють технологічні системи обробітку ґрунту, системи сівби та садіння, системи догляду за посівами (внесення добрив, захист рослин), системи збирання врожаю та системи післязбиральної обробки й зберігання продукції. Кожна з

цих систем має власний склад машин, специфічні технологічні параметри та критерії якості виконання операцій.

Механізовані системи передбачають виконання технологічних операцій машинами під безпосереднім керуванням оператора, тоді як автоматизовані системи включають засоби автоматичного контролю та регулювання технологічних параметрів без постійної участі людини (системи точного землеробства, автоматизовані лінії післязбиральної обробки). Перехід від механізованих до автоматизованих систем підвищує стабільність якості продукції, проте потребує більших початкових інвестицій та кваліфікованого обслуговування.

6. Параметри оцінки систем та вплив зовнішніх умов

Для порівняльної оцінки технологічних систем застосовують такі параметри: продуктивність (годинна, змінна, сезонна), питомі витрати енергії та праці на одиницю продукції, коефіцієнт готовності техніки, рівень втрат продукції та відповідність показників якості нормативним вимогам.

На функціонування технологічних систем аграрного виробництва суттєво впливають зовнішні (некеровані) фактори: погодно-кліматичні умови, властивості ґрунту, стан рослин чи тварин, коливання цін на ресурси. Стійкість системи до цих факторів (адаптивність) є важливою характеристикою її якості, що враховується на етапі проєктування шляхом передбачення резервів потужності, регульованих параметрів та альтернативних технологічних режимів.

$$K_{\Gamma} = T_{\Gamma} / (T_{\Gamma} + T_{\text{в}}) \quad (1)$$

де K_{Γ} - коефіцієнт готовності технологічної системи; T_{Γ} – сумарний час роботи системи за певний період; $T_{\text{в}}$ – сумарний час вимушених простоїв (технічне обслуговування, ремонт, усунення відмов).

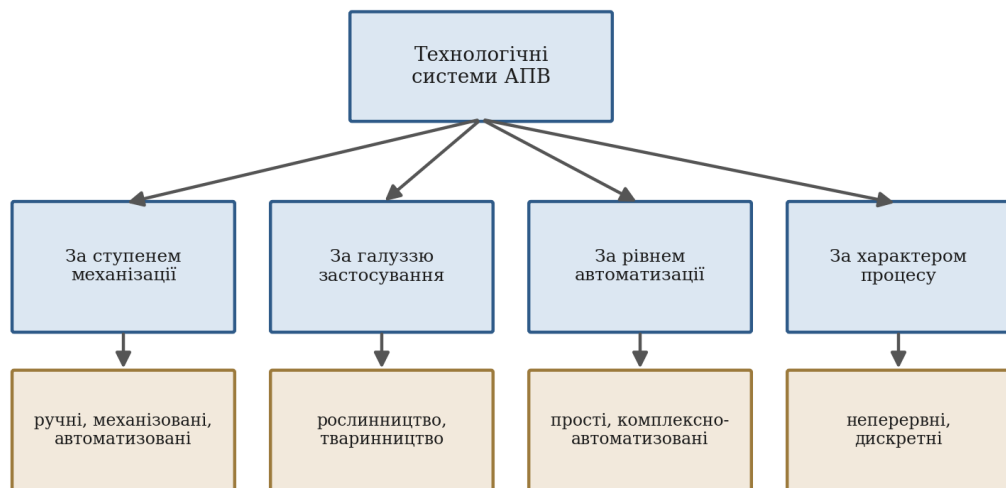


Рисунок 3.1 – Класифікація технологічних систем аграрного виробництва

Контрольні питання

1. Сформулюйте основні принципи системного аналізу.
2. Охарактеризуйте вхідні, внутрішні та вихідні параметри технологічної системи.
3. У чому різниця між негативним і позитивним зворотним зв'язком?
4. Що таке декомпозиція виробничого процесу і для чого вона застосовується?
5. Назвіть основні методи оцінювання ефективності технологічних систем.
6. За якими ознаками класифікують технологічні системи аграрного виробництва?
7. Назвіть основні типи технологічних систем у рослинництві.
8. У чому різниця між механізованими та автоматизованими системами?
9. Які параметри застосовують для оцінювання технологічних систем?
10. Як зовнішні умови впливають на функціонування технологічних систем?

ЛЕКЦІЯ 4. Основи математичного моделювання виробничих процесів

1. Поняття математичної моделі
2. Типи моделей (детерміновані, стохастичні)
3. Вхідні та вихідні змінні
4. Побудова моделей виробничих процесів

Ключові слова: математичне моделювання (*mathematical modeling*); модель (*model*); змінні (*variables*); прогнозування (*forecasting*); система (*system*)

1. Поняття математичної моделі

Математична модель виробничого процесу – це формалізований опис закономірностей функціонування реального технологічного об'єкта, системи або процесу за допомогою математичних залежностей, рівнянь, нерівностей, функцій, матриць, графів, алгоритмів та інших математичних засобів. Вона встановлює кількісний зв'язок між вхідними факторами, параметрами стану системи, керованими впливами та вихідними показниками процесу. Основною метою математичного моделювання є отримання спрощеного, але достатньо адекватного представлення реального виробничого процесу, яке дає змогу аналізувати його поведінку та приймати обґрунтовані інженерні рішення.

У виробничо-технологічних системах агроінженерного призначення математична модель може описувати залежність якості та продуктивності процесу від режимів роботи обладнання, властивостей сировини, витрат енергії, технічного стану машин та умов навколишнього середовища. Наприклад, під час сушіння зерна модель може встановлювати залежність кінцевої вологості зерна від температури теплоносія, його витрати, початкової вологості зерна та тривалості сушіння. У загальному вигляді виробничий процес можна представити залежністю:

$$Y = f(X, U, Z),$$

де Y – вихідні показники процесу;

X – вхідні фактори та властивості сировини;

U – керовані технологічні параметри;
 Z – некеровані фактори та зовнішні умови;
 f – математична залежність, що описує функціонування системи.

До вхідних факторів можуть належати вологість, температура та фізико-механічні властивості сировини, кількість матеріалу, що надходить до машини, якість насіння, характеристики ґрунту тощо. Керованими параметрами є швидкість робочих органів, температура, тиск, продуктивність подачі, тривалість технологічної операції, витрата повітря або теплоносія та інші параметри, які оператор або автоматизована система може змінювати.

Вихідними показниками моделі можуть бути продуктивність обладнання, якість готової продукції, питомі енерговитрати, технологічні втрати, ступінь пошкодження продукції, собівартість та інші характеристики ефективності.

Важливою властивістю математичної моделі є її адекватність, тобто здатність достатньо точно відображати поведінку реального виробничого процесу в межах поставленої задачі. При цьому модель не повинна відтворювати абсолютно всі властивості реального об'єкта. Для її побудови виділяють найбільш суттєві фактори, які мають визначальний вплив на результат, а менш значущі фактори можуть бути спрощені або не враховуватися.

Побудова математичної моделі виробничого процесу передбачає декілька послідовних етапів:

1. Визначення мети моделювання.

Спочатку встановлюється, для чого створюється модель: прогнозування продуктивності, визначення оптимального режиму роботи, оцінювання енерговитрат, управління якістю або дослідження впливу окремих факторів.

2. Визначення вхідних і вихідних параметрів.

Встановлюються фактори, які впливають на процес, та показники, які необхідно отримати в результаті моделювання.

3. Визначення основних закономірностей процесу.

Аналізуються фізичні, механічні, теплові, біологічні та економічні залежності, що визначають функціонування системи.

4. Вибір виду математичної моделі.

Залежно від поставленої задачі можуть використовуватися лінійні та нелінійні рівняння, диференціальні рівняння, статистичні залежності, регресійні моделі, оптимізаційні моделі, імітаційні моделі тощо.

5. Визначення параметрів моделі.

Коефіцієнти математичних залежностей можуть визначатися за результатами експериментів, статистичної обробки даних або на основі теоретичних закономірностей.

6. Перевірка адекватності моделі.

Результати, отримані за допомогою моделі, порівнюють із фактичними даними. Якщо похибка є надмірною, модель уточнюють.

7. Використання моделі для прогнозування та оптимізації.

Після перевірки модель можна застосовувати для аналізу різних режимів роботи обладнання та пошуку найбільш раціонального варіанта.

За характером опису виробничого процесу можна виділити:

- ✓ детерміновані моделі, у яких результат однозначно визначається заданими параметрами;
- ✓ статистичні моделі, що враховують випадковий характер зміни факторів;
- ✓ динамічні моделі, які описують зміну параметрів у часі;
- ✓ статичні моделі, що характеризують стан системи за певних сталих умов;
- ✓ імітаційні моделі, які відтворюють функціонування реальної системи за допомогою комп'ютерних алгоритмів;
- ✓ оптимізаційні моделі, призначені для визначення найкращого режиму роботи за заданим критерієм.

Для дисципліни «Управління якістю та оптимізація технологічних параметрів обладнання в агроінженерії» особливе значення мають оптимізаційні та регресійні моделі. Вони дають

змогу визначити, як зміна технологічних параметрів впливає на продуктивність, якість продукції та витрати ресурсів.

Наприклад, залежність продуктивності зерноочисної машини від швидкості робочого органу може бути представлена функцією:

$$Q = f(n),$$

де Q – продуктивність машини;

n – частота обертання робочого органу.

Однак збільшення швидкості не завжди є доцільним. Разом із продуктивністю можуть зростати енерговитрати та пошкодження зерна. Тому більш повна модель може враховувати декілька факторів:

$$Q = f(n, W, P),$$

де n – швидкість робочого органу;

W – вологість сировини;

P – подача матеріалу.

Одночасно якість продукції можна описати залежністю:

$$K = f(n, W, P),$$

а питомі енерговитрати:

$$e = f(n, W, P).$$

Це дає змогу перейти від простого аналізу одного параметра до багатокритеріальної оптимізації, коли необхідно одночасно забезпечити задану якість, необхідну продуктивність та мінімальні витрати енергії.

Математичне моделювання має особливе значення для агроінженерних систем, оскільки умови їх функціонування постійно змінюються. На результати технологічного процесу впливають властивості сировини, погодні умови, технічний стан обладнання, навантаження та організація виробництва.

Застосування математичних моделей дає можливість:

- ✓ прогнозувати результати технологічного процесу;
- ✓ визначати вплив окремих технологічних параметрів;
- ✓ знаходити оптимальні режими роботи обладнання;
- ✓ зменшувати енергетичні та матеріальні витрати;
- ✓ скорочувати технологічні втрати;

- ✓ підвищувати якість продукції;
- ✓ оцінювати вплив технічного стану обладнання;
- ✓ обґрунтовувати модернізацію технологічних ліній;
- ✓ зменшувати кількість дорогих натурних експериментів;
- ✓ створювати автоматизовані системи керування

технологічними процесами.

Таким чином, математична модель є важливим інструментом управління якістю та оптимізації технологічних параметрів обладнання. Вона дає змогу перейти від емпіричного вибору режимів роботи машин до науково обґрунтованого визначення оптимальних параметрів.

Узагальнено процес математичного моделювання можна представити схемою:

Реальний виробничий процес → визначення факторів → математична модель → розрахунок → порівняння результатів → оптимізація → практичне рішення.

Отже, математичне моделювання забезпечує можливість досліджувати складні виробничо-технологічні системи без безпосереднього втручання в реальний процес, прогнозувати їхню поведінку за різних умов і визначати такі режими роботи обладнання, які забезпечують необхідну якість продукції, високу продуктивність, мінімальні витрати ресурсів та економічну ефективність.

2. Типи моделей (детерміновані, стохастичні)

Детерміновані моделі описують процес однозначною функціональною залежністю, за якої заданому набору вхідних параметрів відповідає єдине значення вихідного показника (наприклад, розрахункові формули механіки). Стохастичні (імовірнісні) моделі враховують випадковий характер вхідних факторів або внутрішніх процесів (варіювання властивостей сировини, випадкові відмови обладнання) і описують вихідний показник у вигляді закону розподілу ймовірностей або його числових характеристик (математичного сподівання, дисперсії).

Вибір типу моделі визначається характером об'єкта дослідження: для процесів зі значною природною варіативністю (біологічні об'єкти, властивості ґрунту) доцільніше застосовувати стохастичні моделі, тоді як для розрахунку детермінованих механічних характеристик – детерміновані.

Детермінована математична модель описує процес однозначною функціональною залежністю, за якої кожному заданому набору вхідних параметрів відповідає конкретне, єдине значення вихідного показника. Якщо параметри системи відомі та незмінні, результат розрахунку також буде однозначним.

У загальному вигляді детерміновану модель можна представити:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n),$$

де Y – вихідний показник;

$X_1, X_2, \dots, X_n$ – вхідні параметри;

f – функціональна залежність між параметрами.

Наприклад, продуктивність технологічного обладнання може визначатися через відому залежність:

$$Q = M / t,$$

де M – кількість обробленого матеріалу, а t – час роботи обладнання. Якщо кількість матеріалу та тривалість роботи задані точно, продуктивність визначається однозначно.

Детерміновані моделі широко використовуються для розрахунку:

- ✓ кінематичних і силових характеристик машин;
- ✓ потужності приводів;
- ✓ продуктивності обладнання;
- ✓ швидкості руху робочих органів;
- ✓ параметрів транспортування матеріалу;
- ✓ теплових процесів;
- ✓ витрат енергії;
- ✓ геометричних параметрів робочих органів;
- ✓ навантажень на деталі та механізми.

Наприклад, при визначенні потужності електродвигуна за заданим навантаженням використовують фізичні залежності, які за певних умов дають однозначний результат.

Перевагою детермінованих моделей є простота математичного опису та можливість отримання конкретного розрахункового результату. Вони особливо ефективні тоді, коли параметри системи можна точно виміряти або коли випадковими факторами можна знехтувати.

Водночас реальні аграрні процеси часто не можуть бути повністю описані детермінованою моделлю. Наприклад, навіть за однакових налаштувань зерноочисної машини якість очищення може змінюватися залежно від вологості, засміченості, розміру зерна та інших властивостей сировини.

Стохастичні, або імовірнісні, моделі застосовують у випадках, коли на процес впливають випадкові фактори або коли окремі параметри неможливо задати абсолютно точно.

На відміну від детермінованої моделі, одному набору вхідних умов у стохастичній моделі може відповідати не одне конкретне значення вихідного показника, а множина можливих значень із певними ймовірностями.

У загальному вигляді це можна представити:

$$Y = f(X, Z, \varepsilon),$$

де X – керовані фактори;

Z – випадкові або некеровані фактори;

ε – випадкова складова моделі.

Результат може характеризуватися не одним числом, а такими статистичними показниками, як: математичне сподівання; дисперсія; середньоквадратичне відхилення; коефіцієнт варіації; ймовірність настання певної події; закон розподілу випадкової величини.

Наприклад, фактична продуктивність зерноочисної машини може змінюватися навіть за незмінних налаштувань, оскільки властивості зернового матеріалу не є абсолютно стабільними. Тому

замість одного прогнозованого значення продуктивності можна визначити її середнє значення та можливий діапазон відхилень.

Застосування стохастичних моделей в агроінженерії

Стохастичні моделі особливо важливі для агроінженерії, оскільки сільськогосподарське виробництво характеризується значною природною мінливістю.

Випадковими або змінними можуть бути: вологість зерна; засміченість сировини; фізико-механічні властивості ґрунту; розміри та маса насіння; нерівномірність урожаю; температура та вологість навколишнього середовища; навантаження на робочі органи; технічний стан обладнання; момент виникнення відмов; тривалість роботи обладнання до відмови; фактична якість готової продукції.

Наприклад, під час експлуатації сільськогосподарської машини момент виникнення відмови не можна точно передбачити. Однак на основі статистичних даних можна визначити ймовірність відмови протягом певного періоду та оцінити середній час безвідмовної роботи.

Це дає змогу вирішувати завдання:

ймовірність відмови → оцінка надійності → планування технічного обслуговування → зменшення простоїв обладнання.

Таблиця 4.2. Приклад вибору моделі від ознаки, що підлягає оцінці

Ознака	Детермінована модель	Стохастична модель
Характер процесу	Визначений	Випадковий або варіативний
Результат	Однозначний	Імовірнісний
Вхідні параметри	Вважаються відомими	Можуть змінюватися випадково
Результат моделювання	Конкретне значення	Розподіл, середнє, дисперсія тощо
Основний інструмент	Рівняння, формули	Теорія ймовірностей, статистика

Приклад	Розрахунок потужності приводу	Імовірність відмови машини
Використання	Механічні та фізичні розрахунки	Варіативні та надійнісні процеси

Вибір між детермінованою та стохастичною моделлю повинен здійснюватися з урахуванням мети дослідження та характеру процесу. Якщо вплив випадкових факторів незначний і параметри процесу можна визначити з достатньою точністю, доцільно використовувати детерміновану модель. Наприклад, для розрахунку навантаження на вал або потужності приводу можна застосовувати класичні фізико-механічні залежності.

Якщо ж процес характеризується значною мінливістю, використання лише детермінованої моделі може призвести до неточних висновків. У такому випадку доцільно застосовувати стохастичний підхід. Особливо це характерно для біологічних об'єктів, ґрунтових процесів, властивостей сільськогосподарської сировини та технічної надійності обладнання.

На практиці часто використовують *детерміновано-стохастичні* моделі, які *поєднують* обидва підходи. Фізична або технологічна закономірність описується детермінованою частиною, а випадкові відхилення враховуються статистичною складовою.

Наприклад:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) + \varepsilon,$$

де $f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ описує основну закономірність процесу, а ε характеризує випадкові відхилення від розрахункового значення.

Такий підхід є особливо корисним для управління якістю. Наприклад, можна визначити середню якість очищення зерна залежно від швидкості робочого органу, а випадкову складову пов'язати з неоднорідністю зернової маси.

Таким чином, детерміновані моделі доцільно застосовувати для процесів, закономірності яких можна описати однозначними математичними залежностями, тоді як стохастичні моделі – для процесів, у яких значну роль відіграють випадкові та змінні фактори. У сучасній агроінженерії найбільш перспективним є

поєднання цих підходів, що дає змогу враховувати як фізичні закономірності роботи обладнання, так і природну варіативність аграрного виробництва. Це підвищує точність прогнозування, дозволяє обґрунтовано оцінювати ризики та створює основу для оптимізації технологічних параметрів і управління якістю продукції.

3. Вхідні та вихідні змінні

У структурі математичної моделі виробничого процесу розрізняють незалежні (вхідні, факторні) змінні, що піддаються регулюванню або вимірюванню (частота обертання робочого органу, вологість матеріалу, швидкість подачі), та залежні (вихідні, відгукові) змінні, що характеризують результат процесу (продуктивність, якість, питомі витрати енергії). Коректний вибір складу змінних є визначальним для практичної цінності моделі.

Побудована та перевірена на адекватність математична модель використовується для прогнозування поведінки виробничого процесу за нових значень вхідних факторів, які не досліджувалися експериментально (у межах області визначення моделі), а також для розв'язання оберненої задачі – визначення значень вхідних параметрів, що забезпечують задані (цільові) значення вихідних показників, зокрема показників якості продукції.

$$Y = b_0 + \sum b_i \cdot x_i + \sum b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum b_{ii} \cdot x_i^2 \quad (1)$$

де Y - загальний вигляд регресійної моделі другого порядку (для планованого багатфакторного експерименту); b_0 , b_i , b_{ij} , b_{ii} – коефіцієнти регресії; x_i , x_j – фактори (незалежні змінні) у кодованому масштабі.

$$R^2 = 1 - (\sum (y_i - \hat{y}_i)^2) / (\sum (y_i - \bar{y})^2) \quad (2)$$

де R - коефіцієнт детермінації як міра адекватності моделі; y_i – фактичні значення відгуку; $\hat{y}_i$ – розрахункові (модельні) значення; $\bar{y}$ – середнє значення відгуку за вибіркою.

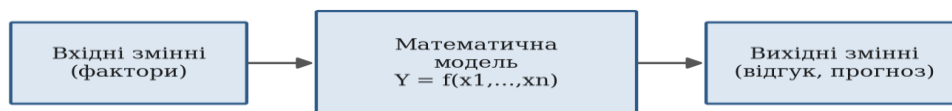


Рисунок 4.1 – Загальна схема математичної моделі виробничого процесу

4. Побудова моделей виробничих процесів

Побудова математичної моделі включає такі етапи: змістовний опис об'єкта та мети моделювання, виявлення суттєвих факторів і показників, вибір виду математичної залежності (регресійної, диференціальної, імітаційної), оцінювання параметрів моделі за експериментальними даними (методом найменших квадратів або іншими методами ідентифікації) та перевірку адекватності моделі шляхом порівняння розрахункових і фактичних значень.

Найпоширенішим підходом у практиці агроінженерних досліджень є побудова регресійних моделей на основі планованого багатофакторного експерименту (наприклад, плану Бокса – Бенкена), що дає змогу отримати рівняння регресії другого порядку з оцінкою значущості коефіцієнтів та перевіркою адекватності моделі за критерієм Фішера.

У дисципліні «Управління якістю та оптимізація технологічних параметрів обладнання в агроінженерії» математичне моделювання дає можливість визначати, як зміна режимів роботи машин впливає на кінцевий результат технологічного процесу, а також знаходити оптимальні значення параметрів.

Загальна послідовність побудови математичної моделі може бути представлена:

Реальний об'єкт → постановка задачі → вибір факторів → планування експерименту → отримання експериментальних даних → побудова моделі → перевірка адекватності → оптимізація → практичне застосування.

1. Змістовний опис об'єкта та визначення мети моделювання

На першому етапі необхідно визначити, що саме досліджується, які процеси відбуваються в системі та який результат необхідно отримати. Наприклад, досліджується зерноочисна машина, яка повинна забезпечувати високу продуктивність та якість очищення зерна при мінімальних енерговитратах.

Метою моделювання може бути:

- визначення впливу швидкості робочого органу на якість очищення;
- визначення впливу подачі зерна на продуктивність;
- встановлення оптимальної швидкості вентилятора;
- визначення режиму роботи, за якого забезпечується необхідна чистота зерна;
- мінімізація питомих енерговитрат;
- одночасне забезпечення високої продуктивності та якості продукції.

Отже, ще до проведення експерименту необхідно чітко визначити критерій оптимізації.

2. Визначення вхідних та вихідних параметрів

Наступним етапом є визначення факторів, які можуть впливати на результат. У математичній моделі фактори позначаються: X_1 , X_2 , X_3 , ..., X_n .

Вихідний показник позначають: Y .

Наприклад, для зерноочисної машини можна прийняти:

X_1 – частота обертання робочого органу, об/хв;

X_2 – подача зерна, т/год;

X_3 – швидкість повітряного потоку, м/с.

Вихідним показником може бути:

Y_1 – продуктивність машини, т/год;

Y_2 – ступінь очищення зерна, %;

Y_3 – питомі енерговитрати, кВт·год/т.

Таким чином, математична модель повинна встановити залежність:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3).$$

3. Вибір математичного виду моделі

Залежно від характеру процесу можуть використовуватися різні види математичних моделей.

Для простих залежностей може застосовуватися лінійна модель:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n.$$

Однак технологічні процеси в агроінженерії часто мають нелінійний характер. Наприклад, надмірне збільшення швидкості робочого органу спочатку підвищує продуктивність, а після досягнення певного значення може призвести до погіршення якості продукції та збільшення енерговитрат.

У таких випадках доцільно використовувати регресійну модель другого порядку:

$$Y = b_0 + \sum b_iX_i + \sum b_{ii}X_i^2 + \sum b_{ij}X_iX_j.$$

Для трьох факторів вона має вигляд:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3.$$

Така модель дає змогу враховувати не тільки прямий вплив кожного фактора, але й нелінійність та взаємодію факторів.

Розглянемо процес очищення зерна від домішок.

Мета дослідження – визначити, як режими роботи зерноочисної машини впливають на ступінь очищення зерна, та встановити оптимальний режим. Прийнемо три основні фактори:

Таблиця 4.1. Приклад визначення факторів впливу

Позначення	Фактор	Нижній рівень	Середній рівень	Верхній рівень
X ₁	Частота обертання робочого органу, об/хв	600	750	900
X ₂	Подача зерна, т/год	2,0	3,0	4,0
X ₃	Швидкість повітряного потоку, м/с	5	7	9

Вихідний показник:

Y – ступінь очищення зерна, %.

Для кожного поєднання параметрів проводять експеримент і визначають фактичне значення Y.

При плануванні експерименту реальні значення факторів часто переводять у кодовані значення.

Для цього використовують формулу:

$$x_i = (X_i - X_0) / \Delta X_i,$$

де:

x_i – кодоване значення фактора;

X_i – фактичне значення фактора;

X_0 – значення фактора в центрі експерименту;

ΔX_i – інтервал варіювання.

Наприклад, для частоти обертання:

- нижній рівень – 600 об/хв;
- центральний – 750 об/хв;
- верхній – 900 об/хв.

Тоді:

$$X_0 = 750 \text{ об/хв};$$

$$\Delta X_1 = 150 \text{ об/хв}.$$

Якщо фактична частота становить 900 об/хв:

$$x_1 = (900 - 750) / 150 = +1.$$

Якщо частота становить 600 об/хв:

$$x_1 = (600 - 750) / 150 = -1.$$

Це дозволяє привести фактори, які мають різні одиниці вимірювання, до єдиної шкали:

-1 → нижній рівень

0 → центральний рівень

+1 → верхній рівень.

Для дослідження трьох факторів можна використовувати план Бокса–Бенкена. Він належить до методів планування експерименту та дає можливість отримати регресійну модель другого порядку при відносно невеликій кількості дослідів. Для трьох факторів експериментальна матриця містить комбінації факторів на рівнях -1,

0, +1. Наприклад, частина експериментальної матриці може мати вигляд:

Таблиця 4.2. Частина експериментальної матриці

№ досліду	x ₁	x ₂	x ₃	Ступінь очищення Y, %
1	-1	-1	0	94,2
2	-1	+1	0	90,8
3	+1	-1	0	95,6
4	+1	+1	0	92,1
5	-1	0	-1	91,7
6	-1	0	+1	95,0
7	+1	0	-1	92,4
8	+1	0	+1	96,1
9	0	-1	-1	93,1
10	0	-1	+1	95,2
11	0	+1	-1	90,5
12	0	+1	+1	93,4
13	0	0	0	95,0

У реальному дослідженні кожен дослід доцільно повторювати декілька разів. Це дозволяє оцінити випадкову похибку експерименту та перевірити статистичну значущість отриманих коефіцієнтів. Після проведення експериментів отримані результати обробляють статистичними методами.

Для моделі другого порядку отримують рівняння:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3.$$

Припустимо, після статистичної обробки експериментальних даних отримано умовне рівняння:

$$Y = 95,1 + 1,2x_1 - 1,5x_2 + 1,0x_3 - 1,4x_1^2 - 1,1x_2^2 - 0,9x_3^2 + 0,3x_1x_2 + 0,2x_1x_3 - 0,4x_2x_3.$$

Це рівняння вже є математичною моделлю досліджуваного процесу. Коефіцієнти регресії дають змогу оцінити вплив окремих факторів.

Наприклад: $+1,2x_1$ означає, що збільшення частоти обертання робочого органу в межах досліджуваного діапазону в середньому підвищує ступінь очищення.

Коефіцієнт: $-1,5x_2$ свідчить, що збільшення подачі зерна негативно впливає на ступінь очищення.

Коефіцієнт: $+1,0x_3$ показує позитивний вплив швидкості повітряного потоку.

Квадратичні коефіцієнти: $-1,4x_1^2$; $-1,1x_2^2$; $-0,9x_3^2$

свідчать про наявність нелінійності. Це означає, що необмежене збільшення факторів не забезпечує постійного підвищення якості.

Саме квадратичні члени дають змогу математично описати ситуацію, коли існує оптимальний режим роботи обладнання. Не кожен отриманий коефіцієнт обов'язково має реальний технологічний вплив. Частина коефіцієнтів може бути статистично незначущою та відображати випадкові коливання експериментальних даних. Тому для кожного коефіцієнта проводиться перевірка статистичної значущості. Якщо коефіцієнт є статистично незначущим, його можна виключити з моделі, після чого отримують спрощене рівняння. Наприклад, якщо виявилось, що коефіцієнт b_{13} статистично незначущий, модель може бути представлена:

$$Y = 95,1 + 1,2x_1 - 1,5x_2 + 1,0x_3 - 1,4x_1^2 - 1,1x_2^2 - 0,9x_3^2 + 0,3x_1x_2 - 0,4x_2x_3.$$

Це спрощує модель та залишає в ній лише статистично обґрунтовані залежності. Наступним етапом є перевірка того, наскільки математична модель відповідає реальному процесу.

Для цього порівнюють: Y_f – фактичне експериментальне значення та Y_r – значення, розраховане за математичною моделлю. Наприклад:

Таблиця 4.3. Порівняння фактичних і розрахункових значень

Дослід	Фактичне Y_f , %	Розрахункове Y_r , %	Відхилення
1	94,2	94,0	0,2
2	90,8	91,1	-0,3
3	95,6	95,4	0,2
4	92,1	92,4	-0,3
5	91,7	91,9	-0,2

Якщо розрахункові значення близькі до експериментальних, модель може вважатися достатньо адекватною. Для статистичної перевірки адекватності регресійної моделі часто використовують критерій Фішера. Розраховане значення критерію F_p порівнюють із табличним F_t при встановленому рівні значущості. Якщо: $F_p < F_t$, то немає підстав вважати модель неадекватною експериментальним даним.

Якщо: $F_p > F_t$, необхідно проаналізувати модель, експериментальні дані та прийняті припущення, оскільки модель може недостатньо точно описувати досліджуваний процес. Після підтвердження адекватності модель можна використовувати для пошуку оптимального режиму роботи обладнання. У нашому прикладі необхідно: максимізувати ступінь очищення зерна $Y \rightarrow \max$. При цьому фактори повинні знаходитися в допустимих межах:

$$-1 \leq x_1 \leq +1$$

$$-1 \leq x_2 \leq +1$$

$$-1 \leq x_3 \leq +1.$$

За допомогою математичних методів можна знайти такі значення факторів, за яких $Y \rightarrow \max$. Наприклад, модель може показати, що найкращий режим знаходиться поблизу:

$$x_1 \approx +0,4$$

$$x_2 \approx -0,5$$

$$x_3 \approx +0,6.$$

Повернемося від кодованих значень до реальних. Для частоти обертання:

$$X_1 = X_0 + x_1 \Delta X_1$$

$$X_1 = 750 + 0,4 \cdot 150 = 810 \text{ об/хв.}$$

Для подачі:

$$X_2 = 3,0 + (-0,5) \cdot 1,0 = 2,5 \text{ т/год.}$$

Для швидкості повітряного потоку:

$$X_3 = 7 + 0,6 \cdot 2 = 8,2 \text{ м/с.}$$

Отже, математична модель дозволяє зробити інженерний висновок: раціональний режим роботи зерноочисної машини може знаходитися приблизно при частоті обертання 810 об/хв, подачі

зерна 2,5 т/год та швидкості повітряного потоку 8,2 м/с – за умови, що саме такі параметри підтверджені конкретним експериментом.

На практиці недостатньо оптимізувати тільки ступінь очищення. Необхідно одночасно враховувати:

якість + продуктивність + енерговитрати + втрати продукції.

Наприклад, можна отримати максимальну чистоту зерна, але при цьому витратити надмірну кількість енергії.

Тому завдання можна сформулювати:

$Y_1 \rightarrow \max$ – ступінь очищення;

$Y_2 \rightarrow \max$ – продуктивність;

$Y_3 \rightarrow \min$ – питомі енерговитрати;

$Y_4 \rightarrow \min$ – втрати повноцінного зерна.

У такому випадку застосовують багатокритеріальну оптимізацію, наприклад через узагальнений критерій або функцію бажаності. Схематично:

Технологічні фактори



Математична модель



Прогноз якості + продуктивності + енерговитрат



Багатокритеріальна оптимізація



Оптимальний технологічний режим



Управління обладнанням

Отримана модель може використовуватися не тільки для наукового дослідження, а й безпосередньо в системі управління виробничо-технологічним процесом.

Наприклад: Датчики → отримання фактичних параметрів → математична модель → оцінка результату → порівняння з оптимальним режимом → коригування роботи обладнання.

Якщо вологість зерна, його засміченість або продуктивність подачі змінюються, система управління може відповідним чином коригувати швидкість робочих органів, подачу матеріалу чи

параметри повітряного потоку. Таким чином, математична модель стає основою автоматизованого управління якістю та оптимізації технологічних параметрів обладнання. Узагальнений алгоритм:

1. Реальний технологічний процес
2. Визначення мети моделювання
3. Вибір факторів $X_1, X_2, X_3 \dots$
4. Вибір плану експерименту
5. Проведення експерименту
6. Отримання експериментальних значень Y
7. Розрахунок коефіцієнтів регресії
8. Перевірка значущості коефіцієнтів
9. Перевірка адекватності за критерієм Фішера
10. Аналіз моделі
11. Пошук оптимального режиму
12. Практичне впровадження результатів.

Отже, математична модель у агроінженерії є не просто способом опису технологічного процесу, а інструментом прийняття інженерних рішень. Вона дозволяє встановити кількісний вплив технологічних факторів на якість та ефективність роботи обладнання, визначити статистично значущі залежності, спрогнозувати результат за різних режимів і знайти оптимальні параметри функціонування виробничо-технологічної системи. Найбільш ефективним підходом для складних агроінженерних процесів є поєднання планування експерименту, регресійного аналізу, статистичної перевірки адекватності та оптимізаційних методів.

Контрольні питання

1. Дайте визначення математичної моделі виробничого процесу.
2. У чому різниця між детермінованими та стохастичними моделями?
3. Опишіть основні етапи побудови математичної моделі технологічного процесу.
4. Що таке вхідні (факторні) та вихідні (відгукові) змінні моделі?
5. Яким чином математична модель використовується для прогнозування та оптимізації процесу?

ЛЕКЦІЯ 5. Показники якості продукції та методи їх оцінювання

1. Поняття якості продукції
2. Кількісні та якісні показники
3. Методи контролю якості
4. Стандарти та нормативи
5. Системи оцінювання

Ключові слова: *якість (quality); показники (indicators); контроль (control); стандарти (standards); оцінювання (evaluation)*

1. Поняття якості продукції

Якість продукції – це сукупність властивостей і характеристик продукції, які визначають її здатність задовольняти встановлені або передбачувані потреби споживача відповідно до її призначення. Поняття якості охоплює не лише відповідність продукції певним нормативним вимогам, а й її безпечність, функціональність, надійність, харчову та біологічну цінність, зовнішній вигляд, зручність використання, транспортабельність і придатність до подальшої переробки.

В агропромисловому виробництві якість має особливе значення, оскільки сільськогосподарська продукція є переважно біологічною сировиною, властивості якої можуть суттєво змінюватися залежно від сорту, породи тварин, природно-кліматичних умов, технології вирощування, строків збирання, умов зберігання та транспортування. Тому забезпечення стабільної якості продукції потребує контролю на всіх етапах технологічного процесу – від виробництва сировини до отримання, зберігання та реалізації готової продукції.

У сільському господарстві якість оцінюють як щодо первинної сировини, так і щодо продукції її переробки. До основних видів сільськогосподарської сировини належать зерно, насіння, молоко, м'ясо, овочі, фрукти, цукрові буряки, олійні культури та інша

продукція рослинного і тваринного походження. Для кожного виду продукції встановлюється певний комплекс показників якості.

Наприклад, для зерна важливими є вологість, натура, маса 1000 зернин, засміченість, зараженість шкідниками, вміст білка, клейковини, склоподібність, схожість та енергія проростання. Для молока визначають жирність, вміст білка, кислотність, густину, чистоту, кількість соматичних клітин, мікробіологічні показники та наявність сторонніх речовин. Якість м'яса характеризують його свіжість, колір, запах, консистенцію, хімічний склад, співвідношення м'язової та жирової тканин, а також мікробіологічні та санітарно-гігієнічні показники.

Для продукції переробних підприємств критерії якості залежать від її призначення. Так, для борошна мають значення сорт, колір, зольність, вологість, вміст і якість клейковини, крупність помелу та хлібопекарські властивості. Для олії оцінюють кислотне й перекисне число, прозорість, колір, запах, смак та інші фізико-хімічні показники. Для молочних, м'ясних, хлібобулочних та інших продуктів встановлюється свій комплекс показників, що дає змогу визначити їх придатність до споживання та відповідність установленим вимогам.

Важливою складовою якості є безпечність продукції. Вона передбачає відсутність або допустимий рівень небезпечних речовин, мікроорганізмів, токсинів, залишків пестицидів, ветеринарних препаратів, важких металів, мікотоксинів та інших забруднювачів. Особливо важливим це є для харчової продукції, оскільки її якість безпосередньо пов'язана зі здоров'ям людини.

Рівень якості продукції визначається за допомогою системи показників якості. Їх можна поділити на декілька основних груп:

органолептичні показники – колір, запах, смак, консистенція, зовнішній вигляд;

фізичні показники – вологість, температура, густина, маса, розміри, механічна міцність;

хімічні показники – вміст білків, жирів, вуглеводів, мінеральних речовин, кислотність тощо;

біологічні та мікробіологічні показники – наявність мікроорганізмів, показники безпечності, життєздатність насіння;

технологічні показники – придатність сировини до очищення, сушіння, зберігання та переробки;

експлуатаційні показники – довговічність, надійність, транспортабельність і зручність використання;

економічні показники – вихід готової продукції, втрати під час переробки, витрати ресурсів та економічна ефективність.

Особливе значення має стабільність якості, тобто здатність виробника забезпечувати встановлені характеристики продукції протягом певного періоду та для різних партій. У сучасному агропромисловому виробництві це досягається шляхом упровадження систем контролю якості, автоматизації технологічних процесів, використання сучасного обладнання, дотримання технологічних режимів та належної організації зберігання і транспортування.

Вимоги до якості продукції визначаються державними та міжнародними стандартами, технічними регламентами, нормативними документами, технічними умовами, договорами між виробниками та споживачами, а також специфічними вимогами певних ринків. Для продукції, що експортується, можуть встановлюватися додаткові вимоги щодо її безпечності, простежуваності, пакування, маркування, фізико-хімічних та мікробіологічних показників.

Таким чином, якість продукції агропромислового виробництва є комплексною характеристикою, яка формується під впливом природних, технологічних, організаційних та економічних факторів. Забезпечення високої якості потребує системного підходу та постійного контролю всього виробничого ланцюга: виробництво сировини → збирання → очищення та сортування → транспортування → зберігання → переробка → пакування → реалізація. Висока якість сприяє підвищенню конкурентоспроможності продукції, зменшенню втрат, ефективнішому використанню ресурсів, розширенню ринків збуту

та підвищенню економічної ефективності агропромислового підприємства.

2. Кількісні та якісні показники

Показники якості поділяють на кількісні (вимірювані числові величини – вологість, вміст білка, засміченість, розмір фракції) та якісні (описові характеристики – колір, запах, зовнішній вигляд, відповідність сортовим ознакам, які оцінюються експертно або органолептично). Кількісні показники, як правило, є більш об'єктивними та придатними для статистичного аналізу й побудови математичних моделей.

Для об'єктивної оцінки якості продукції використовують показники якості – кількісні або якісні характеристики окремих властивостей продукції, які дають змогу визначити її відповідність установленим вимогам, стандартам та призначенню. Сукупність таких показників формує загальну характеристику якості конкретного виду продукції. За способом визначення показники якості умовно поділяють на кількісні та якісні.

Кількісні показники виражаються конкретними числовими значеннями та визначаються шляхом вимірювання, лабораторного аналізу або розрахунку. До них належать вологість, вміст білка, жирність, кислотність, маса, густина, засміченість, розмір частинок або фракції, натура зерна, зольність, температура, міцність та інші характеристики. Наприклад, вологість зерна може бути визначена у відсотках, вміст білка – у відсотках від маси продукту, а розмір частинок – у міліметрах.

Кількісні показники мають важливе значення для технологічного контролю, оскільки дають змогу порівнювати різні партії продукції, встановлювати відхилення від нормативних значень, контролювати стабільність технологічного процесу та прогнозувати властивості готової продукції. Наприклад, підвищення вологості зерна понад допустимий рівень може призвести до погіршення його зберігання, розвитку мікроорганізмів, самозігрівання та збільшення енергетичних витрат на сушіння.

Якісні показники характеризують властивості продукції переважно в описовій формі. До них належать колір, запах, смак, зовнішній вигляд, консистенція, характер поверхні, однорідність, відповідність сортовим або видовим ознакам. Такі характеристики часто визначаються за допомогою органолептичної оцінки, експертного аналізу або порівняння із встановленими еталонами.

Наприклад, якість зерна може оцінюватися за його кольором, характерним запахом, однорідністю та відповідністю типовим ознакам культури й сорту. Для харчової продукції важливими є також смак, аромат і консистенція. Незважаючи на те, що такі показники можуть мати суб'єктивний характер, вони відіграють важливу роль при визначенні споживчих властивостей продукції.

Водночас поділ показників на кількісні та якісні не завжди є абсолютно чітким. Частину якісних характеристик можна формалізувати та перевести у кількісну форму за допомогою спеціальних шкал оцінювання. Наприклад, колір може визначатися за спеціальною шкалою або приладами, запах і смак – за бальною системою, а зовнішній вигляд – шляхом оцінювання за визначеними критеріями. Це дозволяє підвищити об'єктивність контролю та використовувати результати для подальшого статистичного аналізу.

Особливе значення для сучасного агропромислового виробництва мають кількісні показники, оскільки вони є більш придатними для математичного опрацювання. На їх основі можна визначати середні значення, дисперсію, коефіцієнт варіації, кореляційні залежності, будувати регресійні моделі та здійснювати прогнозування.

Наприклад, під час дослідження процесу сушіння зерна можна встановити залежність вологості зерна від температури сушильного агента, тривалості сушіння та швидкості руху повітря. Отримані числові дані дозволяють побудувати математичну модель і визначити оптимальний режим технологічного процесу.

Крім того, показники якості можуть класифікуватися за призначенням та характером властивостей:

- ✓ фізичні – вологість, температура, густина, розмір, маса;

- ✓ хімічні – вміст білка, жиру, цукрів, кислотність, зольність;
- ✓ біологічні – схожість насіння, енергія проростання, біологічна активність;
- ✓ мікробіологічні – кількість і види мікроорганізмів, наявність патогенних форм;
- ✓ органолептичні – колір, запах, смак, консистенція, зовнішній вигляд;
- ✓ технологічні – придатність сировини до очищення, сушіння, зберігання та переробки;
- ✓ показники безпечності – вміст токсичних речовин, пестицидів, важких металів, мікотоксинів та інших небезпечних компонентів.

Для практичної оцінки продукції важливо враховувати не один окремий показник, а їх сукупність. Наприклад, висока якість зерна не може визначатися лише низькою вологістю. Необхідно одночасно враховувати його засміченість, зараженість шкідниками, натуру, вміст білка, стан зерна та інші характеристики.

Отже, кількісні та якісні показники доповнюють один одного. Кількісні показники забезпечують точність, об'єктивність і можливість математичного аналізу, тоді як якісні дають змогу оцінити властивості продукції, які не завжди можна повністю описати одним числовим значенням. Комплексне використання обох груп показників забезпечує більш повну та достовірну оцінку якості продукції, дозволяє контролювати технологічні процеси, виявляти причини відхилень і приймати обґрунтовані рішення щодо подальшого використання або переробки сировини.

3. Методи контролю якості

Методи контролю якості поділяють на суцільний контроль (перевірка кожної одиниці продукції – застосовується рідко через високу трудомісткість) та вибіркового контролю (перевірка репрезентативної вибірки з подальшим статистичним висновком про партію продукції загалом). За способом отримання інформації розрізняють руйнівні методи контролю (потребують знищення

зразка – наприклад, визначення міцності) та неруйнівні методи (оптичні, електрофізичні датчики, що дають змогу контролювати показники без пошкодження продукції).

Контроль якості продукції – це сукупність організаційних, вимірювальних, лабораторних та аналітичних процедур, спрямованих на визначення відповідності продукції встановленим вимогам, стандартам, технічним умовам і заданим параметрам. Контроль здійснюють на різних етапах виробничого процесу: під час приймання сировини, її очищення та підготовки, переробки, зберігання, пакування та відвантаження готової продукції.

В агропромисловому виробництві правильний вибір методу контролю має особливе значення, оскільки необхідно одночасно забезпечити достовірність результатів, оперативність контролю, збереження продукції та мінімальні витрати на проведення вимірювань.

За обсягом продукції, що підлягає перевірці, методи контролю поділяють на суцільні та вибіркові. Суцільний контроль передбачає перевірку кожної одиниці продукції або всієї партії без винятку. Такий підхід забезпечує найбільш повну інформацію про фактичний стан продукції та дає змогу виявити практично кожен випадок невідповідності. Суцільний контроль доцільний тоді, коли продукція має високу вартість, підвищені вимоги до безпеки або коли навіть одиничний дефект може мати значні наслідки.

Водночас у масовому агропромисловому виробництві суцільний контроль застосовується обмежено, оскільки перевірка великої кількості зерна, насіння, молока чи іншої продукції потребує значних витрат часу, праці, лабораторних ресурсів та обладнання. Крім того, деякі показники якості можна визначити лише шляхом руйнування зразка, тому перевірити таким способом кожную одиницю продукції практично неможливо.

Вибірковий контроль передбачає перевірку певної частини продукції – репрезентативної вибірки, яка повинна адекватно характеризувати всю партію. За результатами дослідження вибірки

за допомогою статистичних методів роблять висновок про якість партії в цілому.

Наприклад, під час приймання великої партії зерна немає необхідності проводити лабораторний аналіз кожної зернини. Із різних місць партії відбирають проби, формують середній зразок і визначають його вологість, засміченість, зараженість, натуру та інші показники. Отримані результати поширюють на всю партію за умови правильного відбору та достатньої репрезентативності вибірки.

Перевагами вибіркового контролю є зменшення трудомісткості, скорочення часу проведення аналізів, зниження витрат і можливість оперативного прийняття рішень. Проте його ефективність значною мірою залежить від правильності формування вибірки. Якщо проба відібрана неправильно або не відображає реального стану всієї партії, статистичний висновок може бути помилковим.

За способом отримання інформації методи контролю поділяють на руйнівні та неруйнівні. Руйнівні методи контролю передбачають, що для визначення певного показника зразок продукції частково або повністю змінюється, пошкоджується чи знищується. До таких методів можна віднести визначення механічної міцності, опору руйнуванню, деякі хімічні та фізико-хімічні аналізи, під час яких зразок не може бути повернений у початковий стан.

Наприклад, під час визначення міцності зерна, гранул комбікорму або іншої продукції зразок піддають механічному навантаженню до моменту руйнування. Руйнівні методи часто характеризуються високою точністю, але їх недоліком є те, що досліджений зразок втрачає свою придатність для подальшого використання.

Неруйнівні методи контролю дають змогу визначати характеристики продукції без її пошкодження або істотної зміни властивостей. Вони особливо перспективні для автоматизованих виробничих систем, оскільки дозволяють проводити контроль безперервно та в режимі реального часу.

До неруйнівних методів належать:

оптичні методи – аналіз кольору, форми, розміру, поверхні та інших зовнішніх характеристик;

інфрачервоні методи – визначення вологості, вмісту окремих компонентів та інших властивостей;

електрофізичні методи – використання електричних характеристик матеріалу для оцінювання його стану;

ультразвукові методи – визначення внутрішньої структури та механічних властивостей;

ємнісні та діелектричні методи – визначення вологості та інших властивостей сільськогосподарської продукції;

відео- та машинний контроль – автоматичне розпізнавання дефектів, домішок, сторонніх включень і відхилень за допомогою камер та алгоритмів комп'ютерного аналізу.

Особливо важливе значення неруйнівні методи мають у сучасних автоматизованих технологічних лініях. Наприклад, датчики вологості можуть постійно контролювати стан зерна під час сушіння, а оптичні системи – визначати наявність домішок або пошкоджених зернин під час сортування. Отримана інформація може автоматично передаватися до системи керування, яка змінює параметри роботи обладнання.

Таким чином, методи контролю якості можуть комбінуватися. На практиці доцільно поєднувати вибірковий контроль із неруйнівними методами, а за необхідності підтверджувати результати окремими лабораторними дослідженнями. Такий підхід дозволяє забезпечити достатню достовірність оцінки якості та водночас зменшити витрати часу і ресурсів.

Вибір методу контролю залежить від виду продукції, контрольованого показника, вимог до точності, вартості дослідження, швидкості отримання результату та можливості автоматизації процесу. У сучасному агропромисловому виробництві спостерігається перехід від періодичного лабораторного контролю до комплексних автоматизованих систем, які поєднують датчики, засоби вимірювання, статистичний аналіз і програмне забезпечення для оперативного прийняття технологічних рішень.

4. Стандарти та нормативи

Показники якості сільськогосподарської продукції та вимоги до методів їх визначення регламентуються державними стандартами (ДСТУ), технічними регламентами та, за потреби експорту, міжнародними стандартами (ISO, Codex Alimentarius). Стандарти встановлюють як допустимі межі значень показників якості (наприклад, гранично допустиму вологість зерна при зберіганні), так і уніфіковані методики їх вимірювання, що забезпечує порівнянність результатів контролю в різних лабораторіях.

Показники якості та безпечності сільськогосподарської продукції не визначаються довільно. Для кожного виду продукції та конкретного показника існують нормативні вимоги, які встановлюють допустимі значення, правила відбору проб, методи проведення вимірювань, порядок оцінювання отриманих результатів та критерії відповідності продукції встановленим вимогам.

В Україні важливу роль у цьому процесі відіграють державні стандарти України (ДСТУ), технічні регламенти, нормативні документи та інші встановлені вимоги. Вони регламентують характеристики продукції залежно від її виду, призначення та умов використання. Наприклад, для зернової продукції можуть встановлюватися вимоги щодо вологості, засміченості, зараженості шкідниками, натури, вмісту білка, якості клейковини, схожості насіння та інших показників.

Особливе значення мають граничні або допустимі значення показників. Вони дають змогу визначити, чи відповідає продукція встановленим вимогам. Наприклад, перевищення допустимого рівня вологості зерна може свідчити про необхідність його додаткового сушіння перед тривалим зберіганням. Надмірна вологість створює сприятливі умови для розвитку мікроорганізмів, самозігрівання та погіршення якості зерна.

Нормативні документи визначають не тільки «що потрібно вимірювати», а й «як саме це потрібно вимірювати». Це має принципове значення, оскільки результати одного й того самого показника можуть відрізнятися залежно від використаного

обладнання, умов проведення аналізу, способу підготовки зразка та методики вимірювання.

Наприклад, визначення вологості зерна може здійснюватися різними способами – висушуванням зразка до сталої маси, електричними або іншими інструментальними методами. Якщо різні лабораторії використовують різні методики без установлених правил їх застосування, результати можуть бути складними для порівняння. Саме тому стандарти встановлюють уніфіковані методики випробувань та вимірювань.

Важливою складовою стандартизованого контролю є правильний відбір проб. Зразок, який направляється до лабораторії, повинен бути репрезентативним для всієї партії продукції. Нормативні документи можуть встановлювати кількість точкових проб, місця та порядок їх відбору, способи формування середньої проби, умови її пакування, транспортування та зберігання. Неправильний відбір проб може призвести до отримання результатів, які не характеризують фактичний стан усієї партії.

Стандартизація методів контролю забезпечує порівнянність результатів. Якщо дві лабораторії використовують однакову або належним чином стандартизовану методику, результати їхніх досліджень можуть бути об'єктивно порівняні. Це особливо важливо під час приймання сировини, укладання контрактів, визначення вартості продукції, проведення сертифікації та вирішення спірних питань між виробником і покупцем.

Для продукції, яка реалізується на міжнародних ринках, важливими є також міжнародні стандарти та системи вимог. Серед них особливе місце займають стандарти ISO та документи Codex Alimentarius, які містять міжнародно визнані підходи до якості та безпечності харчової продукції. Дотримання відповідних вимог може бути необхідною умовою для виходу виробника на певні зовнішні ринки.

ISO об'єднує міжнародні стандарти, що використовуються для забезпечення єдиних підходів до управління, вимірювань, випробувань та контролю різних характеристик продукції і процесів.

У сфері харчової продукції особливого значення набувають системи управління безпечністю харчових продуктів та стандартизовані методи контролю.

Codex Alimentarius – міжнародна система стандартів, настанов і рекомендацій у сфері харчових продуктів. Її документи спрямовані насамперед на забезпечення безпечності харчових продуктів, захист здоров'я споживачів та формування узгоджених міжнародних вимог до продукції.

Нормативні вимоги можна умовно поділити на кілька основних груп:

- ✓ вимоги до фізичних показників – вологість, маса, розмір, густина, температура тощо;
- ✓ вимоги до хімічного складу – вміст білка, жиру, цукрів, кислотність, зольність та інші характеристики;
- ✓ вимоги до мікробіологічних показників – допустимі рівні мікроорганізмів та відсутність небезпечних патогенних форм;
- ✓ вимоги до безпечності – допустимі рівні залишків пестицидів, ветеринарних препаратів, важких металів, мікотоксинів та інших забруднювачів;
- ✓ органолептичні вимоги – колір, запах, смак, консистенція, зовнішній вигляд;
- ✓ технологічні вимоги – придатність продукції до зберігання, транспортування, переробки та подальшого використання;
- ✓ вимоги до маркування, пакування та транспортування – інформація про продукцію, умови її зберігання та реалізації.

Таким чином, стандартизація є основою об'єктивного контролю якості сільськогосподарської продукції. Вона встановлює єдині правила оцінювання, допустимі межі показників та методики їх визначення. Це дає можливість виробнику контролювати технологічний процес, лабораторіям отримувати зіставні результати, а споживачам – отримувати продукцію прогнозованої якості та безпечності.

Особливо важливо, що стандартизація створює основу для математичного та статистичного аналізу результатів контролю. Оскільки вимірювання проводяться за уніфікованими методиками та в установлених одиницях, отримані дані можуть використовуватися для визначення середніх значень, варіації показників, встановлення залежностей між параметрами технологічного процесу та якістю готової продукції, а також для побудови математичних моделей і систем автоматизованого контролю.

Отже, нормативне регулювання якості забезпечує єдність вимог, достовірність вимірювань, порівнянність результатів та можливість об'єктивного визначення відповідності сільськогосподарської продукції встановленим критеріям. У сучасному агропромисловому виробництві це є необхідною умовою ефективного управління якістю, підвищення конкурентоспроможності продукції та її виходу на внутрішній і міжнародний ринки.

5. Системи оцінювання

Комплексна система оцінювання якості продукції передбачає визначення інтегрального (узагальненого) показника якості на основі системи одиничних показників із урахуванням їх вагомості для конкретного виду продукції та ринку збуту. У світовій практиці набули поширення системи управління якістю на основі стандартів серії ISO 9000, а також галузеві системи (НАССР – для харчової продукції), що передбачають безперервний контроль на всіх етапах виробництва, а не лише кінцевий контроль готової продукції.

$$K_y = \sum(w_i \cdot q_i), \quad i = 1 \dots n \quad (1)$$

де K_y - комплексний (інтегральний) показник якості продукції; w_i – коефіцієнт вагомості i -го одиничного показника якості ($\sum w_i = 1$); q_i – відносна оцінка i -го показника (від 0 до 1) щодо нормативного (еталонного) значення; n – кількість урахованих показників.

$$P = (n - m) / n \cdot 100\% \quad (2)$$

де P - Частка продукції, що відповідає вимогам якості (для вибіркового контролю); n – обсяг вибірки; m – кількість одиниць продукції у вибірці, що не відповідають нормативним вимогам.

У сучасному агропромисловому виробництві оцінювання якості продукції не обмежується визначенням одного окремого показника. Якість є багатокритеріальною характеристикою, оскільки продукція одночасно повинна відповідати вимогам щодо безпечності, фізичних і хімічних властивостей, технологічної придатності, споживчих характеристик та економічної ефективності. Тому для об'єктивної оцінки доцільно використовувати комплексну систему показників якості.

Комплексне оцінювання передбачає формування системи одиничних показників, кожен з яких характеризує окрему властивість продукції, та визначення на їх основі узагальненого або інтегрального показника якості. Такий підхід дозволяє отримати єдину оцінку, яка характеризує загальний рівень якості продукції з урахуванням значущості окремих властивостей.

До системи одиничних показників можуть входити, наприклад: вологість; вміст білка; засміченість; зараженість шкідниками; натура зерна; механічна міцність; органолептичні характеристики; мікробіологічні показники; показники безпечності; технологічна придатність; термін зберігання та стабільність властивостей.

При цьому не всі показники мають однакове значення. Їх вагомість залежить від виду продукції, її призначення, технології подальшої переробки та конкретного ринку збуту. Наприклад, для зерна, призначеного для виробництва хліба, важливими можуть бути вміст білка та якість клейковини, тоді як для зерна, яке використовується на кормові цілі, більшого значення можуть набувати інші характеристики. Для експортної продукції додаткову вагу можуть мати показники безпечності та відповідність вимогам країни-імпортера.

При комплексному оцінюванні показники можуть мати різну спрямованість. Для одних характеристик збільшення значення свідчить про покращення якості, наприклад вміст білка в певних видах продукції. Для інших, навпаки, бажаним є зменшення значення – наприклад, засміченості, вмісту небезпечних домішок

або кількості дефектної продукції. Тому перед об'єднанням показників їх часто нормують, тобто переводять у зіставну форму.

Загальна логіка комплексного оцінювання може бути представлена так:

одиничні показники → нормування → визначення вагомості → об'єднання показників → інтегральний показник якості → оцінка відповідності продукції вимогам.

Вагомість окремих показників може визначатися експертним методом, статистичним аналізом, результатами досліджень споживчого попиту або на основі нормативних вимог. Наприклад, якщо для певного ринку показники безпечності мають критичне значення, їм надається вища вагомість у загальній оцінці.

Інтегральний показник особливо корисний при порівнянні різних партій продукції, технологічних режимів або виробничих підприємств. Наприклад, можна порівняти якість зерна, отриманого за традиційною та ресурсозберігальною технологіями, враховуючи одночасно вологість, засміченість, пошкодження зерна, енерговитрати на сушіння та інші параметри.

Комплексне оцінювання якості є лише однією складовою сучасного управління якістю. Традиційний підхід передбачає переважно контроль уже виготовленої продукції: готовий продукт перевіряють, після чого приймають рішення про його відповідність установленим вимогам.

Недоліком такого підходу є те, що дефект виявляється вже після завершення технологічного процесу. На цей момент ресурси на виробництво продукції вже витрачені, а виправлення дефектів може бути неможливим або економічно не вигідним.

Сучасна концепція передбачає перехід від контролю кінцевого результату до управління якістю на всіх етапах виробництва. Контролюються не лише властивості готової продукції, а й сировина, технологічні операції, параметри обладнання, умови зберігання, транспортування та інші фактори, які можуть впливати на якість.

Важливе місце у світовій практиці займають системи управління якістю на основі стандартів серії ISO 9000. Їхня основна ідея полягає у системному управлінні процесами підприємства, документуванні процедур, визначенні відповідальності, аналізі ризиків і постійному вдосконаленні діяльності.

Застосування системи управління якістю дозволяє:

- ✓ встановлювати чіткі вимоги до продукції та виробничих процесів;
- ✓ контролювати якість сировини;
- ✓ визначати критичні етапи виробництва;
- ✓ своєчасно виявляти відхилення;
- ✓ встановлювати причини виникнення дефектів;
- ✓ запобігати повторенню невідповідностей;
- ✓ підвищувати стабільність виробничого процесу;
- ✓ зменшувати втрати сировини та готової продукції;
- ✓ підвищувати довіру споживачів і конкурентоспроможність підприємства.

Для підприємств харчової промисловості особливого значення набув підхід НАССР (Hazard Analysis and Critical Control Points – аналіз небезпечних факторів і критичні точки контролю). Його основна відмінність полягає в тому, що система орієнтована передусім на запобігання небезпекам, а не тільки на виявлення дефектів готового продукту.

У межах НАССР аналізуються потенційні біологічні, хімічні та фізичні небезпечні фактори, які можуть виникнути або потрапити в продукцію на різних етапах технологічного процесу. Після цього визначаються критичні точки, у яких необхідно здійснювати особливо ретельний контроль.

Наприклад, під час переробки зерна можуть контролюватися приймання сировини, очищення, сушіння, умови зберігання, запобігання потраплянню сторонніх домішок та інші технологічні операції. Якщо на певному етапі існує ризик виникнення небезпечного відхилення, встановлюються допустимі межі та процедури контролю.

Таким чином, система НАССР передбачає принцип попередження проблеми, а не лише її виявлення після завершення виробництва. Це особливо важливо для харчових продуктів, оскільки деякі небезпечні фактори неможливо виявити за зовнішнім виглядом, запахом або смаком готової продукції.

Однією з основних тенденцій сучасного агропромислового виробництва є перехід до безперервного контролю та моніторингу технологічних процесів. Для цього використовуються датчики температури, вологості, тиску, витрати матеріалу, оптичні системи, автоматизовані лабораторні комплекси та інформаційні системи.

Отримані дані можуть надходити до автоматизованої системи керування, яка порівнює фактичні параметри із заданими значеннями. У разі виникнення відхилення система може сформулювати попередження або автоматично скоригувати режим роботи обладнання.

Наприклад, під час сушіння зерна безперервний контроль температури та вологості дозволяє своєчасно змінювати параметри подачі теплового агента. Це дає можливість одночасно забезпечувати необхідну якість зерна, запобігати пересушуванню та зменшувати витрати енергії.

Отже, сучасна система управління якістю має вигляд замкненого циклу: вимірювання → аналіз → порівняння з нормативом → виявлення відхилення → коригувальна дія → повторний контроль → удосконалення процесу.

Такий підхід дозволяє перейти від пасивного виявлення браку до активного запобігання його виникненню.

Таким чином, комплексна оцінка якості дозволяє врахувати сукупність властивостей продукції та визначити її узагальнений рівень з урахуванням вагомості окремих показників. Водночас сучасне управління якістю передбачає не тільки оцінювання готової продукції, а й постійний контроль та оптимізацію всіх технологічних процесів.

Поєднання комплексного оцінювання, стандартизованих методів контролю, систем ISO 9000, НАССР, автоматизованого

моніторингу та статистичного аналізу створює основу для формування системи безперервного управління якістю. Для агропромислових підприємств це дає змогу підвищити стабільність якості продукції, зменшити втрати сировини, енергетичні та матеріальні витрати, забезпечити безпечність продукції та підвищити її конкурентоспроможність на внутрішньому і міжнародному ринках.

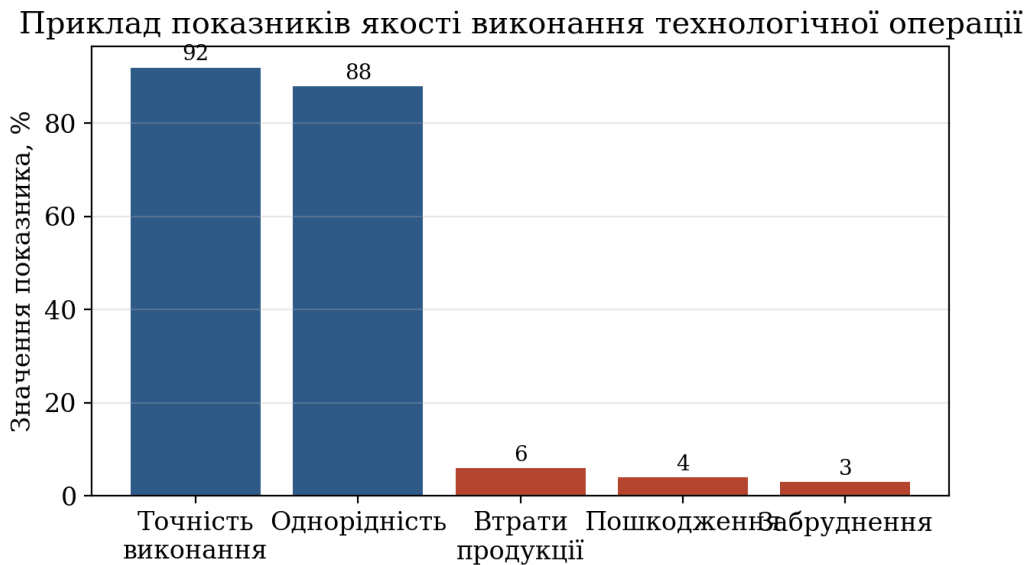


Рисунок 5.1 – Приклад показників якості виконання технологічної операції

Контрольні питання

1. Дайте визначення поняття «якість продукції».
2. У чому різниця між кількісними та якісними показниками якості?
3. Охарактеризуйте суцільний і вибіркового методи контролю якості.
4. Яку роль відіграють стандарти ДСТУ та ISO в оцінюванні якості продукції?
5. Як обчислюється комплексний (інтегральний) показник якості продукції?

ЛЕКЦІЯ 6. Методи контролю та управління якістю в агровиробництві

1. Системи управління якістю
2. Оперативний контроль процесів
3. Моніторинг технологічних операцій
4. Коригувальні дії
5. Стандартизація процесів

Ключові слова: *контроль (control); управління якістю (quality management); моніторинг (monitoring); стандартизація (standardization); система (system)*

1. Системи управління якістю

Система управління якістю (СУЯ) – це сукупність організаційної структури, процедур, процесів і ресурсів, необхідних для здійснення управління якістю на підприємстві. У світовій практиці найпоширенішою є модель СУЯ на основі стандарту ISO 9001, що ґрунтується на процесному підході та циклі безперервного вдосконалення PDCA (Plan – Do – Check – Act: плануй – виконуй – перевіряй – дій). У харчовій промисловості додатково застосовують систему НАССР, спрямовану на аналіз ризиків і контроль критичних точок технологічного процесу.

Основною метою СУЯ є не лише виявлення дефектів готової продукції, а насамперед запобігання їх виникненню шляхом системного управління всіма процесами, які впливають на якість. Система охоплює весь життєвий цикл продукції – від визначення потреб споживача та вибору сировини до виробництва, зберігання, транспортування, реалізації та аналізу задоволеності споживачів.

Для агропромислових підприємств функціонування СУЯ має особливе значення, оскільки кінцева якість продукції залежить від великої кількості взаємопов'язаних факторів: якості сировини, умов її зберігання, технологічних режимів, технічного стану обладнання, кваліфікації персоналу, умов транспортування та дотримання санітарно-гігієнічних вимог.

Одним із ключових принципів сучасної СУЯ є процесний підхід. Він передбачає розгляд діяльності підприємства не як сукупності окремих операцій або підрозділів, а як системи взаємопов'язаних процесів.

Кожен процес має:

- ✓ вхідні ресурси – сировину, матеріали, інформацію, енергію;
- ✓ послідовність технологічних операцій;
- ✓ вихідний результат – продукцію або послугу;
- ✓ показники ефективності та якості;
- ✓ відповідальних осіб;
- ✓ засоби контролю та моніторингу.

Наприклад, процес виробництва борошна може розглядатися як послідовність операцій: приймання зерна → очищення → підготовка → помел → сортування → контроль якості → пакування → зберігання.

При цьому якість результату кожного наступного етапу залежить від якості попереднього. Якщо на етапі приймання використовується сировина з підвищеною вологістю або значною засміченістю, це може негативно вплинути на подальші технологічні операції та якість готової продукції.

Процесний підхід дає змогу визначити критичні та найбільш важливі етапи виробництва, встановити показники їх результативності та своєчасно виявляти відхилення.

ISO 9001 як основа системи управління якістю

Однією з найбільш поширених міжнародних моделей побудови СУЯ є система, заснована на вимогах ISO 9001. Стандарт орієнтує підприємство на системне управління процесами, орієнтацію на споживача, оцінювання ризиків, документування необхідних процедур, моніторинг результативності та постійне вдосконалення.

Важливим принципом є те, що відповідальність за якість не повинна покладатися виключно на відділ технічного контролю або лабораторію. Якість формується всіма працівниками та всіма

процесами підприємства. Тому керівництво визначає політику і цілі у сфері якості, працівники виконують установлені процедури, а система контролю забезпечує отримання інформації про фактичний стан процесів.

Застосування СУЯ на основі ISO 9001 дозволяє підприємству:

- ✓ чітко визначити вимоги до продукції;
- ✓ встановити відповідальність працівників;
- ✓ стандартизувати технологічні та організаційні процеси;
- ✓ контролювати якість сировини та матеріалів;
- ✓ систематично аналізувати результати вимірювань;
- ✓ виявляти причини невідповідностей;
- ✓ запроваджувати коригувальні та запобіжні заходи;
- ✓ оцінювати ризики;
- ✓ підвищувати задоволеність споживачів;
- ✓ постійно вдосконалювати діяльність підприємства.

Цикл PDCA

Важливим інструментом безперервного вдосконалення є цикл PDCA (Plan – Do – Check – Act), який українською можна передати як «Плануй – Виконуй – Перевірйай – Дій».

Цикл передбачає чотири послідовні етапи.

1. Plan – плануй.

На цьому етапі визначають цілі у сфері якості, вимоги до продукції, необхідні ресурси, технологічні параметри та критерії оцінювання результатів. Аналізуються можливі ризики та фактори, які можуть негативно вплинути на якість.

2. Do – виконуй.

Заплановані заходи реалізуються на практиці. Виробничий процес здійснюється відповідно до встановлених технологічних режимів, інструкцій та процедур.

3. Check – перевіряй.

Проводиться моніторинг і вимірювання фактичних результатів. Отримані показники порівнюють із установленими нормативами або плановими значеннями. Визначаються відхилення та причини їх виникнення.

4. Act – дій.

На основі результатів перевірки приймаються рішення щодо коригування процесу та його подальшого вдосконалення. За необхідності змінюються технологічні режими, процедури контролю, обладнання або організація роботи.

Отже, після завершення одного циклу PDCA починається наступний, що забезпечує безперервне вдосконалення системи управління якістю.

НАССР у харчовій промисловості

Для підприємств, які виробляють харчову продукцію, важливим доповненням до загальної системи управління є НАССР – Hazard Analysis and Critical Control Points (аналіз небезпечних факторів і критичні точки контролю).

Основною метою НАССР є забезпечення безпечності харчової продукції шляхом запобігання виникненню небезпечних факторів або контролю їх на тих етапах технологічного процесу, де це є найбільш ефективним.

Під час розроблення системи НАССР аналізують можливі:

- ✓ біологічні небезпеки – бактерії, віруси, паразити та інші мікроорганізми;
- ✓ хімічні небезпеки – токсичні речовини, залишки пестицидів, мийних засобів тощо;
- ✓ фізичні небезпеки – металеві частинки, каміння, скло та інші сторонні предмети.

Після визначення небезпечних факторів встановлюються критичні точки контролю, тобто етапи, на яких контроль є принципово важливим для запобігання небезпеці або її зменшення до прийняттого рівня.

Наприклад, на підприємстві з переробки зерна критичними можуть бути окремі етапи приймання сировини, очищення, сушіння, зберігання та переробки, залежно від конкретної технологічної схеми та результатів аналізу небезпек.

Взаємозв'язок ISO 9001 та НАССР

ISO 9001 і HACCP мають спільну системну основу, але різне основне призначення. ISO 9001 орієнтований на управління якістю та результативністю процесів у цілому, тоді як HACCP зосереджений передусім на управлінні небезпеками та забезпеченні безпечності харчової продукції.

Їхнє поєднання дозволяє підприємству створити комплексну систему, у якій:

управління процесами → контроль якості → аналіз ризиків → контроль критичних точок → моніторинг → коригувальні дії → постійне вдосконалення.

Автоматизація системи управління якістю

Сучасні СУЯ дедалі більше інтегруються з цифровими технологіями та автоматизованими системами контролю. Датчики температури, вологості, тиску, продуктивності, витрати енергії та інші засоби вимірювання можуть у режимі реального часу передавати інформацію до системи керування.

Це дає можливість не тільки фіксувати факт відхилення, а й автоматично реагувати на нього. Наприклад, при зміні вологості зерна система може коригувати параметри сушіння, а при перевищенні встановленої температури – подавати сигнал оператору або змінювати режим роботи обладнання.

Використання цифрових технологій також дозволяє накопичувати великі масиви даних про виробничі процеси. На їх основі можна проводити статистичний аналіз, виявляти закономірності, прогнозувати виникнення дефектів та оптимізувати технологічні режими.

Таким чином, система управління якістю є комплексним механізмом управління всіма процесами, які впливають на якість та безпечність продукції. Її основою є процесний підхід, орієнтація на споживача, оцінювання ризиків, постійний моніторинг і безперервне вдосконалення.

Застосування ISO 9001 дозволяє систематизувати управління якістю на підприємстві, а використання HACCP у харчовій промисловості забезпечує системний контроль небезпечних

факторів. Поєднання цих підходів із сучасними засобами автоматизації, цифрового моніторингу та статистичного аналізу створює ефективну основу для стабільного виробництва якісної, безпечної та конкурентоспроможної агропромислової продукції.

2. Оперативний контроль процесів

Оперативний контроль технологічного процесу здійснюється безпосередньо під час виконання операції та передбачає вимірювання поточних значень контрольованих параметрів (вологості, температури, швидкості, геометричних розмірів) із порівнянням їх із встановленими нормативними межами. За результатами оперативного контролю приймається рішення про продовження процесу в незмінному режимі, коригування режимних параметрів або зупинку процесу для усунення виявлених відхилень.

Оперативний контроль технологічного процесу – це система контролю, яка здійснюється безпосередньо під час виконання технологічних операцій і спрямована на своєчасне виявлення відхилень параметрів процесу від установлених нормативних або оптимальних значень. Його головною метою є забезпечення стабільності технологічного процесу та попередження отримання продукції неналежної якості.

На відміну від кінцевого контролю, який дає змогу оцінити вже готову продукцію, оперативний контроль дозволяє виявити проблему ще в момент її виникнення. Це дає можливість своєчасно втрутитися в технологічний процес, скоригувати його параметри та не допустити накопичення дефектів або втрат продукції.

У процесі оперативного контролю здійснюється вимірювання поточних значень контрольованих параметрів, до яких можуть належати:

- ✓ вологість сировини та продукції;
- ✓ температура матеріалу, повітря або технологічного середовища;
- ✓ швидкість руху матеріалу, повітря чи робочих органів машин;
- ✓ продуктивність технологічного обладнання;

- ✓ тиск у пневматичних і гідравлічних системах;
- ✓ витрата повітря, води, палива або енергії;
- ✓ геометричні розміри та форма продукції;
- ✓ маса та дозування компонентів;
- ✓ частота обертання робочих органів;
- ✓ навантаження електродвигунів;
- ✓ показники якості та безпечності сировини й готової продукції.

Отримані значення порівнюються із заданими нормативними, допустимими або оптимальними межами. За результатами порівняння визначається фактичний стан технологічного процесу.

У найпростішому випадку можна виділити три зони:

нормальний режим → допустиме відхилення → критичне відхилення.

Якщо фактичне значення параметра знаходиться в установленому діапазоні, процес продовжується без змін. Якщо параметр наближається до граничного значення, оператор або автоматизована система може виконати коригування режиму. Якщо ж перевищено критичну межу, процес може бути зупинений для встановлення причини відхилення та його усунення.

Основні рішення за результатами оперативного контролю

За результатами оперативного контролю можливі три основні варіанти управлінських рішень.

1. Продовження процесу в установленому режимі.

Якщо всі контрольовані параметри відповідають заданим значенням, технологічна операція продовжується без втручання. Це свідчить про стабільність процесу.

2. Коригування режимних параметрів.

Якщо виявлено відхилення, яке ще не призвело до критичного порушення процесу, змінюють відповідні параметри обладнання. Наприклад, регулюють температуру сушильного агента, швидкість подачі зерна, інтенсивність вентиляції, частоту обертання робочого органу або продуктивність транспортера.

3. Зупинка технологічного процесу.

Якщо відхилення перевищує допустимі межі та може призвести до погіршення якості продукції, аварійної ситуації або пошкодження обладнання, процес зупиняють. Після цього встановлюють причину відхилення та виконують необхідні коригувальні дії.

В агропромисловому виробництві оперативний контроль широко застосовується під час очищення, сушіння, транспортування, сортування та переробки зерна. Наприклад, під час сушіння постійно контролюють температуру сушильного агента та вологість зерна. Якщо температура перевищує встановлену межу, це може призвести до пошкодження зерна або погіршення його технологічних властивостей. Якщо вологість знижується недостатньо, збільшується тривалість сушіння та витрати енергії. Під час очищення зерна оперативно контролюють продуктивність машини, навантаження робочих органів, параметри повітряного потоку та якість очищення. При збільшенні кількості домішок у готовому продукті необхідно скоригувати режим роботи очисної машини. Під час транспортування контролюють продуктивність конвеєрів, швидкість руху матеріалу, навантаження електродвигунів та рівномірність подачі зерна. Це дозволяє запобігати перевантаженню обладнання, просипанню матеріалу та надмірному енергоспоживанню.

Сучасні технологічні лінії дедалі частіше використовують автоматизовані системи оперативного контролю. У таких системах вимірювання параметрів здійснюється за допомогою датчиків, а отримана інформація передається до контролера або комп'ютерної системи керування.

Загальна схема роботи має вигляд:

датчик → вимірювання → передача інформації → порівняння з нормативом → визначення відхилення → управлінське рішення → коригування процесу.

Наприклад, датчик безперервно вимірює температуру. Система порівнює фактичне значення із заданим діапазоном. Якщо температура виходить за межі допустимого інтервалу, система

автоматично змінює подачу тепла або формує сигнал оператору. Автоматизація має значні переваги порівняно з періодичним ручним контролем, оскільки дозволяє:

- ✓ здійснювати безперервний моніторинг;
- ✓ швидко виявляти відхилення;
- ✓ зменшувати вплив людського фактора;
- ✓ автоматично коригувати технологічні режими;
- ✓ накопичувати дані про роботу обладнання;
- ✓ аналізувати динаміку зміни параметрів;
- ✓ прогнозувати можливі порушення процесу;
- ✓ зменшувати втрати продукції;
- ✓ підвищувати енергоефективність виробництва.

Оперативний контроль є важливою складовою системи управління якістю, оскільки він забезпечує зворотний зв'язок між фактичним станом технологічного процесу та встановленими вимогами.

Його можна представити як замкнений контур:

встановлення нормативу → вимірювання → порівняння → виявлення відхилення → коригувальна дія → повторне вимірювання.

Таким чином, контроль стає не лише засобом фіксації проблеми, а інструментом управління технологічним процесом.

Особливо важливим є поєднання оперативного контролю з математичними методами аналізу. На основі накопичених даних можна визначати середні значення параметрів, їхню мінливість, встановлювати взаємозв'язки між режимними параметрами та якістю продукції, а також будувати математичні моделі технологічних процесів. Основною перевагою оперативного контролю є його попереджувальний характер. Виявлення відхилення на ранній стадії дозволяє усунути його з мінімальними втратами. Якщо ж проблему виявити лише після завершення технологічного циклу, частина продукції вже може бути непридатною для реалізації або потребувати додаткової переробки.

Наприклад, своєчасне виявлення підвищення температури під час сушіння дає змогу одразу скоригувати режим. Якщо ж відхилення буде виявлено тільки під час лабораторного контролю готової продукції, партія вже може мати погіршені властивості. Отже, оперативний контроль забезпечує стабільність технологічного процесу, підвищує якість і безпечність продукції, зменшує втрати сировини, сприяє раціональному використанню енергетичних ресурсів та підвищує ефективність роботи обладнання.

У сучасному агропромисловому виробництві найбільш перспективним є поєднання оперативного контролю з автоматизацією, цифровими датчиками, системами збору даних та інтелектуальними алгоритмами керування. Це дозволяє перейти від простого спостереження за параметрами до автоматичного прогнозування та попередження небажаних змін технологічного процесу.

3. Моніторинг технологічних операцій

Моніторинг технологічного процесу – це систематичне та цілеспрямоване спостереження, вимірювання, реєстрація й аналіз параметрів виробничого процесу протягом певного періоду. На відміну від одноразового контролю, моніторинг передбачає постійне або періодичне накопичення інформації, що дає змогу оцінити не тільки поточний стан процесу, а й закономірності та тенденції зміни його параметрів.

Основною метою моніторингу є своєчасне виявлення відхилень, встановлення тенденцій погіршення або покращення якості, прогнозування можливих проблем та прийняття обґрунтованих управлінських рішень. Таким чином, моніторинг є важливим елементом системи управління якістю та забезпечує інформаційну основу для вдосконалення технологічних процесів.

У процесі моніторингу можуть контролюватися:

- ✓ температура сировини, продукції та технологічного середовища;
- ✓ вологість зерна та інших матеріалів;

- ✓ продуктивність технологічного обладнання;
- ✓ швидкість руху матеріалу;
- ✓ тиск і витрата повітря;
- ✓ споживання електричної та теплової енергії;
- ✓ навантаження електродвигунів;
- ✓ геометричні параметри продукції;
- ✓ кількість домішок і дефектів;
- ✓ показники якості готової продукції;
- ✓ параметри навколишнього та виробничого середовища.

Моніторинг тісно пов'язаний з оперативним контролем, але ці поняття не є тотожними. Оперативний контроль орієнтований переважно на оцінювання поточного стану процесу та прийняття негайного рішення: продовжувати процес, змінити режим або зупинити обладнання. Моніторинг має більш тривалий характер і передбачає накопичення та аналіз даних у часі. Завдяки цьому можна виявити тенденції, які неможливо побачити за результатами одного вимірювання.

Наприклад, одноразове вимірювання температури сушіння може показати, що вона відповідає нормативу. Однак аналіз даних за кілька годин або днів може показати поступове підвищення температури, нестабільність роботи обладнання або повторювані відхилення. Це дозволяє виявити проблему ще до того, як вона призведе до погіршення якості продукції.

Однією з найважливіших функцій моніторингу є формування масиву статистичних даних. Кожне вимірювання може супроводжуватися інформацією про час, місце проведення, стан обладнання, технологічний режим та отримане значення показника.

Наприклад, під час сушіння зерна можна накопичувати дані про: час → температуру сушильного агента → вологість зерна → продуктивність сушарки → витрати енергії.

Після накопичення достатньої кількості даних можна проводити статистичний аналіз, визначати:

- ✓ середнє значення показника;
- ✓ мінімальні та максимальні значення;

- ✓ діапазон коливань;
- ✓ дисперсію;
- ✓ стандартне відхилення;
- ✓ коефіцієнт варіації;
- ✓ частоту виникнення відхилень;
- ✓ взаємозв'язки між різними параметрами.

Це дозволяє перейти від простого «вимірювання показника» до аналізу поведінки технологічної системи.

Для аналізу стабільності технологічного процесу можуть використовуватися контрольні карти. Вони є графічним інструментом статистичного контролю, за допомогою якого відстежують зміну певного показника в часі.

На контрольній карті зазвичай відображають:

- ✓ центральну лінію – середній або цільовий рівень показника;
- ✓ верхню контрольну межу;
- ✓ нижню контрольну межу;
- ✓ фактичні значення показника, отримані під час вимірювань.

Якщо значення параметра стабільно знаходяться в межах контрольних границь і не демонструють аномальних тенденцій, процес можна вважати статистично стабільним. Якщо ж з'являються точки за межами контрольних границь або характерні послідовні тенденції, це може свідчити про порушення нормального перебігу процесу. Наприклад, поступове збільшення вологості готового зерна може свідчити про зміну режиму роботи сушарки, зношення обладнання або нестабільність подачі теплового агента.

Сучасні технологічні лінії агропромислового виробництва дедалі частіше обладнуються автоматизованими системами моніторингу, які забезпечують безперервний збір інформації без необхідності постійного ручного вимірювання.

Основними елементами такої системи є: датчики → мережа передачі даних → контролер або сервер → база даних → програмне забезпечення → оператор або автоматизована система керування.

Датчики можуть вимірювати температуру, вологість, тиск, швидкість, рівень матеріалу, енергоспоживання та інші параметри. Дані передаються до центральної системи, де вони зберігаються, обробляються та відображаються у зручному для оператора вигляді.

Особливо перспективним є використання технологій Internet of Things (IoT – Інтернет речей). IoT передбачає об'єднання фізичних пристроїв, датчиків, обладнання та програмних систем у єдину інформаційну мережу.

У технологічній лінії агропромислового підприємства окремі датчики можуть передавати інформацію практично безперервно. Наприклад: датчик вологості зерна → мережа → система збору даних → аналіз → визначення відхилення → автоматичне коригування режиму сушіння.

Перевагою такого підходу є можливість здійснювати моніторинг у режимі реального часу. Оператор не повинен постійно виконувати ручні вимірювання – система самостійно збирає та передає інформацію. Застосування IoT дозволяє:

- ✓ забезпечити безперервне спостереження за технологічним процесом;
- ✓ контролювати параметри одночасно в декількох точках;
- ✓ оперативно виявляти відхилення;
- ✓ зберігати історію вимірювань;
- ✓ дистанційно контролювати обладнання;
- ✓ аналізувати роботу технологічної лінії;
- ✓ прогнозувати виникнення несправностей;
- ✓ оптимізувати витрати енергії та ресурсів;
- ✓ підвищувати стабільність якості продукції.

Важливою перевагою тривалого накопичення даних є можливість переходу від реактивного до прогнозного управління. За наявності достатньої кількості даних можна встановити закономірності між параметрами технологічного процесу та якістю

продукції. Наприклад, аналіз великого масиву інформації може показати, що певне поєднання температури, вологості та продуктивності сушарки з великою ймовірністю призводить до погіршення якості зерна.

На цій основі можуть створюватися математичні моделі та алгоритми прогнозування, які дозволяють заздалегідь визначити ймовірність виникнення небажаного відхилення.

Таким чином, система може працювати за принципом: виявлення параметра → аналіз тенденції → прогноз → попередження → коригування режиму → перевірка результату.

Моніторинг є одним із ключових елементів цифровізації агропромислового виробництва. Поєднання датчиків, автоматизованих систем керування, баз даних, хмарних технологій, статистичного аналізу та штучного інтелекту створює можливість формування цифрової моделі виробничого процесу.

У результаті підприємство може отримувати не тільки інформацію про поточний стан обладнання та продукції, а й аналітичну інформацію про ефективність роботи, причини відхилень та можливі майбутні зміни. Отже, моніторинг технологічного процесу є систематичним процесом збору, реєстрації та аналізу інформації про стан виробництва протягом тривалого часу. На відміну від разового контролю, він дозволяє виявляти не тільки поточні відхилення, а й тенденції та закономірності зміни показників. Застосування автоматизованих систем моніторингу, мереж IoT та сучасних засобів аналізу даних забезпечує безперервний контроль технологічних процесів у режимі реального часу. Це створює умови для своєчасного коригування режимів роботи обладнання, підвищення стабільності якості продукції, зменшення втрат і ресурсних витрат, а також переходу до прогнозного та інтелектуального управління агропромисловим виробництвом.

4. Коригувальні дії

У разі виявлення відхилень контрольованих параметрів за межі допустимих значень система управління якістю передбачає

виконання коригувальних дій: оперативне регулювання режиму роботи обладнання, усунення виявлених технічних несправностей, коригування вихідної сировини (сортування, додаткова обробка) або перегляд технологічного регламенту за системного характеру відхилень. Ефективність коригувальних дій оцінюється за результатами подальшого контролю.

У разі виявлення відхилень контрольованих параметрів технологічного процесу за встановлені допустимі або нормативні межі система управління якістю передбачає виконання коригувальних дій. Їх основною метою є не лише усунення безпосереднього прояву невідповідності, а й встановлення та усунення причин її виникнення, запобігання повторенню аналогічних порушень у подальшому.

Коригувальні дії є важливою складовою замкненого циклу управління якістю: виявлення відхилення → аналіз причин → прийняття рішення → виконання коригувальних заходів → повторний контроль → оцінювання результату. Такий підхід забезпечує оперативне реагування на зміни технологічного процесу та сприяє його стабілізації.

Відхилення показників технологічного процесу можуть бути зумовлені різними чинниками. В агропромисловому виробництві до них належать:

- ✓ зміна властивостей або якості вихідної сировини;
- ✓ порушення встановленого режиму роботи обладнання;
- ✓ зношування або несправність робочих органів машин;
- ✓ неправильне налаштування технологічного обладнання;
- ✓ нестабільність подачі сировини;
- ✓ зміна температури, вологості, тиску, швидкості повітряного потоку та інших параметрів;
- ✓ помилки персоналу під час виконання технологічних операцій;
- ✓ несправність або неточність вимірювальних приладів і датчиків;
- ✓ порушення послідовності технологічних операцій;

✓ невідповідність фактичних умов роботи обладнання встановленому технологічному регламенту.

Встановлення причини відхилення має принципове значення. Наприклад, підвищення вологості зерна після сушіння може бути пов'язане не тільки з недостатньою температурою сушильного агента, а й із надмірною подачею зерна, нерівномірністю його переміщення, зміною початкової вологості або несправністю датчика.

Найпростішим видом коригувальних дій є оперативне регулювання режимних параметрів обладнання. Воно здійснюється безпосередньо під час технологічного процесу, коли виявлене відхилення ще не призвело до значного погіршення якості продукції.

Наприклад, у процесі сушіння зерна може здійснюватися:

- ✓ регулювання температури сушильного агента;
- ✓ зміна швидкості руху повітря;
- ✓ коригування продуктивності подачі зерна;
- ✓ зміна тривалості перебування продукції в робочій зоні;
- ✓ регулювання витрати палива або теплової енергії.

Під час очищення зерна коригування може передбачати зміну швидкості обертання робочих органів, інтенсивності повітряного потоку, положення регулювальних елементів або продуктивності подачі матеріалу.

Автоматизовані системи управління дають змогу виконувати такі операції безпосередньо за сигналами датчиків. У цьому випадку відхилення параметра автоматично порівнюється із заданим значенням, після чого система формує керуючий сигнал на виконавчий механізм.

Якщо причиною невідповідності є технічний стан обладнання, коригувальні дії повинні бути спрямовані на його відновлення. Це може включати:

- ✓ очищення робочих органів від налиплого матеріалу;
- ✓ заміну зношених деталей;
- ✓ регулювання механізмів;

- ✓ перевірку приводів;
- ✓ відновлення електричних з'єднань;
- ✓ калібрування або заміну датчиків;
- ✓ перевірку систем автоматичного керування;
- ✓ технічне обслуговування та ремонт обладнання.

Особливого значення такі заходи набувають у безперервних технологічних лініях, де несправність одного елемента може спричинити порушення роботи всієї системи. Наприклад, нестабільна робота транспортера може призвести до нерівномірної подачі сировини на очисну або сушильну машину, що, у свою чергу, спричинить погіршення якості кінцевої продукції.

У деяких випадках відхилення пов'язане не з обладнанням, а з невідповідністю властивостей вихідної сировини встановленим вимогам. Тоді необхідно здійснювати її додаткову підготовку або обробку.

Для зернової продукції такими заходами можуть бути:

- ✓ додаткове очищення від домішок;
- ✓ сортування за розміром або якістю;
- ✓ повторне сушіння;
- ✓ додаткове вентилявання;
- ✓ вилучення пошкодженого або зараженого зерна;
- ✓ формування однорідних партій;
- ✓ змішування компонентів у встановлених пропорціях,

якщо це допускається технологічними вимогами.

Такі дії дозволяють не допустити надходження невідповідної сировини на наступну технологічну операцію та зменшити ризик отримання продукції, яка не відповідатиме встановленим вимогам.

Якщо однакове відхилення виникає регулярно або спостерігається протягом тривалого часу, одноразове регулювання обладнання вже не є достатнім. У такому випадку необхідно провести аналіз причин систематичної невідповідності.

Наприклад, якщо протягом тривалого періоду фактична вологість зерна після сушіння стабільно перевищує задане значення, причиною може бути невідповідність встановленого

режиму фактичним властивостям сировини або конструктивним і експлуатаційним характеристикам сушарки.

За систематичного характеру відхилень може виникнути необхідність:

- ✓ перегляду технологічного регламенту;
- ✓ уточнення допустимих меж параметрів;
- ✓ зміни режимів роботи обладнання;
- ✓ зміни послідовності технологічних операцій;
- ✓ удосконалення методики контролю;
- ✓ модернізації обладнання;
- ✓ підвищення кваліфікації персоналу;
- ✓ удосконалення системи автоматичного контролю.

При цьому зміна технологічного регламенту повинна здійснюватися обґрунтовано, на основі результатів вимірювань, статистичного аналізу та оцінювання впливу параметрів на якість продукції.

Виконання коригувальної дії саме по собі не гарантує усунення проблеми. Тому обов'язковим етапом є подальший контроль, за результатами якого визначають її результативність.

Після внесення коригувань повторно вимірюють відповідні параметри та порівнюють їх із нормативними або заданими значеннями. Якщо показники повернулися до допустимого діапазону і залишаються стабільними протягом певного часу, коригувальна дія може вважатися результативною.

Якщо відхилення зберігається, необхідно повторно проаналізувати причини та визначити додаткові заходи. Таким чином, система управління якістю функціонує за принципом зворотного зв'язку, забезпечуючи постійне коригування технологічного процесу. Результати коригувальних дій доцільно документувати. Фіксуються дата і час виникнення відхилення, значення контрольованого параметра, характер невідповідності, встановлена причина, виконані заходи та результати повторного контролю. Накопичення таких даних створює інформаційну основу для статистичного аналізу та виявлення повторюваних проблем.

На сучасних підприємствах значна частина коригувальних дій може виконуватися автоматично. Система отримує інформацію від датчиків, порівнює фактичні значення з установленими параметрами та формує відповідні керуючі сигнали.

Наприклад: датчик → вимірювання → порівняння із заданим значенням → виявлення відхилення → автоматичне регулювання → повторне вимірювання.

Такий підхід особливо ефективний для процесів сушіння, вентильовання, транспортування, дозування та очищення зерна, де параметри можуть змінюватися протягом технологічного циклу.

Автоматизація дає змогу скоротити час реагування, зменшити вплив людського фактора, запобігти значним втратам продукції та забезпечити більш стабільне використання енергетичних і матеріальних ресурсів.

Коригувальні дії забезпечують перехід від виявлення проблеми до її системного усунення. Якщо оперативний контроль відповідає на питання «чи відповідає процес установленим вимогам зараз?», то коригувальні дії відповідають на питання «що необхідно зробити для усунення відхилення та недопущення його повторення?». У системі управління якістю коригувальні дії тісно пов'язані з моніторингом, оперативним контролем, статистичним аналізом і циклом PDCA. Дані про відхилення використовуються не тільки для поточного регулювання, а й для вдосконалення технологічних процесів у довгостроковій перспективі.

Таким чином, коригувальні дії є невід'ємною складовою системи управління якістю в агропромисловому виробництві. Вони забезпечують своєчасне усунення відхилень, стабілізацію технологічних процесів, зменшення втрат сировини та енергії, підвищення якості й безпечності продукції. Поєднання оперативного реагування з аналізом причин і повторним контролем створює основу для безперервного вдосконалення виробництва та підвищення його ефективності.

5. Стандартизація процесів

Стандартизація технологічних процесів передбачає розроблення та впровадження уніфікованих регламентів виконання операцій, методик контролю якості та форм звітності, що забезпечує відтворюваність результатів незалежно від зміни обслуговуючого персоналу. Стандартизовані процедури є основою для сертифікації системи управління якістю підприємства та підтвердження відповідності продукції вимогам національних і міжнародних стандартів.

Стандартизація технологічних процесів є важливою складовою системи управління якістю підприємства та передбачає розроблення, документування, впровадження і постійне вдосконалення уніфікованих вимог до виконання технологічних операцій. Її основною метою є забезпечення стабільності технологічного процесу, повторюваності результатів та отримання продукції із заданими показниками якості незалежно від зміни персоналу, обладнання або виробничих умов у межах установлених допусків.

У агропромисловому виробництві стандартизація має особливе значення, оскільки якість кінцевої продукції залежить від великої кількості взаємопов'язаних операцій. Наприклад, під час виробництва та переробки зерна результат визначається якістю вихідної сировини, режимами очищення, сушіння, транспортування, зберігання, дозування, переробки та пакування. Порушення встановленого режиму хоча б на одній із цих стадій може призвести до погіршення якості продукції.

Стандартизація технологічного процесу передбачає встановлення чітких вимог до:

- ✓ послідовності виконання технологічних операцій;
- ✓ параметрів роботи машин і обладнання;
- ✓ допустимих меж зміни технологічних показників;
- ✓ якості та характеристик вихідної сировини;
- ✓ способів підготовки сировини до переробки;
- ✓ методів і періодичності контролю;
- ✓ вимог до технічного обслуговування обладнання;

- ✓ правил відбору та підготовки проб;
- ✓ методик визначення показників якості;
- ✓ порядку реєстрації та зберігання результатів контролю;
- ✓ дій персоналу у випадку виникнення відхилень;
- ✓ критеріїв приймання або бракування продукції.

Таким чином, стандартизація визначає не тільки що необхідно отримати, а й як саме має бути організований процес для отримання стабільного результату.

Одним із основних інструментів стандартизації є технологічний регламент, у якому встановлюються параметри та послідовність виконання технологічних операцій. Регламент може містити характеристики сировини, режими роботи обладнання, допустимі відхилення, порядок контролю та критерії якості готової продукції.

Важливу роль відіграють також стандартні операційні процедури (SOP), які детально описують порядок виконання конкретної операції. Наприклад, стандартна процедура може визначати порядок запуску зерносушарки, підготовки обладнання до роботи, відбору проб зерна, перевірки вологості або виконання операцій з очищення обладнання. Документовані процедури дозволяють мінімізувати залежність результату від особистого досвіду окремого працівника. Працівник повинен виконувати операцію відповідно до встановленої послідовності та заданих параметрів, а не визначати режим роботи виключно на основі власного досвіду.

Окремим напрямом є стандартизація методів контролю якості. Для кожного показника повинні бути визначені методика його вимірювання, засоби вимірювальної техніки, умови проведення аналізу, порядок відбору проб та критерії оцінювання результатів. Наприклад, під час контролю зерна можуть визначатися вологість, засміченість, натура, вміст білка, зараженість шкідниками та інші показники. Якщо різні працівники використовують різні методики або неоднаково відбирають проби, результати контролю можуть істотно відрізнятися навіть для однієї партії продукції.

Уніфікована методика забезпечує порівнянність результатів у часі та між різними підрозділами або лабораторіями. Це особливо важливо при прийманні сировини, визначенні її вартості, контролі технологічного процесу, сертифікації та передачі продукції споживачу. Важливим результатом стандартизації є встановлення єдиного порядку дій працівників. Для кожної відповідальної технологічної операції повинні бути визначені:

- ✓ відповідальна особа;
- ✓ необхідне обладнання та інструменти;
- ✓ послідовність виконання операції;
- ✓ контрольовані параметри;
- ✓ допустимі значення показників;
- ✓ порядок дій при виявленні відхилень;
- ✓ спосіб документування результатів.

Наприклад, оператор сушильного обладнання повинен знати встановлені межі температури сушильного агента, допустиму продуктивність, порядок контролю вологості зерна та алгоритм дій у разі перевищення допустимої температури.

Це забезпечує відтворюваність технологічних результатів навіть за зміни оператора або робочої зміни. Стандартизація неможлива без належного документування. Результати виконання технологічних операцій і контролю якості можуть фіксуватися у:

- ✓ технологічних журналах;
- ✓ контрольних листах;
- ✓ електронних формах звітності;
- ✓ протоколах лабораторних досліджень;
- ✓ актах невідповідності;
- ✓ електронних базах даних;
- ✓ автоматизованих інформаційних системах.

Документування дозволяє встановити, коли, ким, за яких умов і з якими результатами була виконана певна операція. Це підвищує простежуваність продукції та створює інформаційну базу для аналізу причин виникнення відхилень.

У сучасних підприємствах паперову звітність поступово доповнюють або замінюють цифрові системи. Дані від датчиків можуть автоматично передаватися до інформаційної системи, де вони накопичуються, аналізуються та використовуються для контролю стабільності технологічного процесу.

Одним із головних завдань стандартизації є забезпечення стабільності показників якості. Навіть якщо середнє значення показника відповідає нормативним вимогам, значні коливання між окремими партіями або в межах однієї партії можуть свідчити про нестабільність процесу.

Наприклад, під час сушіння зерна необхідно забезпечити не тільки досягнення необхідної середньої вологості, а й рівномірність сушіння. Надмірне сушіння окремої частини зерна може спричинити втрати енергії та погіршення його технологічних властивостей, тоді як недостатньо висушене зерно може мати підвищений ризик псування під час зберігання. Тому стандартизація повинна передбачати не тільки кінцеві значення показників, а й вимоги до стабільності та відтворюваності процесу.

Стандартизовані технологічні процедури є важливою основою для функціонування та сертифікації системи управління якістю підприємства. Наявність документованих процесів дозволяє визначити відповідальних осіб, встановити критерії контролю, оцінювати результати та демонструвати керованість виробничої діяльності.

Під час оцінювання системи управління якістю важливим є не лише наявність документів, а й підтвердження того, що встановлені процедури фактично виконуються та забезпечують запланований результат. Таким чином, стандартизація створює основу для переходу від індивідуального виконання операцій до системного управління технологічними процесами.

У разі орієнтації підприємства на зовнішні ринки стандартизація набуває додаткового значення. Продукція повинна відповідати не тільки внутрішнім вимогам підприємства, а й вимогам відповідного ринку, нормативних документів, контрактів

та міжнародних систем оцінювання відповідності. Застосування стандартизованих методів контролю дозволяє підтвердити відповідність продукції встановленим вимогам і забезпечує довіру між виробником, переробником, торговельною організацією та кінцевим споживачем. Особливо важливою є простежуваність: можливість встановити походження сировини, умови її переробки, результати контролю та подальший рух готової продукції.

Стандартизація не означає незмінність технологічного процесу. Навпаки, встановлений стандарт створює базовий рівень, відносно якого можна оцінювати ефективність удосконалень. Результати моніторингу та контролю дають змогу виявляти відхилення, визначати їх причини та оцінювати можливості оптимізації. Якщо запропонована зміна забезпечує стабільніше значення показників якості, зменшує втрати або енергоспоживання, відповідні процедури можуть бути переглянуті та вдосконалені.

Таким чином, стандартизація безпосередньо пов'язана з циклом PDCA (Plan – Do – Check – Act):

Plan – встановлення вимог і розроблення технологічних процедур;

Do – виконання стандартизованого процесу;

Check – контроль та оцінювання отриманих результатів;

Act – коригування та вдосконалення встановлених процедур.

Стандартизація технологічних процесів забезпечує: стабільність та відтворюваність якості продукції; зменшення впливу людського фактора; чіткий розподіл відповідальності між працівниками; зниження кількості технологічних помилок; підвищення ефективності контролю; скорочення виробничих втрат; раціональне використання сировини, енергії та інших ресурсів; підвищення простежуваності продукції; спрощення аналізу причин невідповідностей; створення доказової бази для сертифікації; підвищення конкурентоспроможності підприємства.

Отже, стандартизація технологічних процесів є основою стабільного функціонування системи управління якістю. Вона забезпечує єдині вимоги до виконання операцій, контролю

параметрів, документування результатів і реагування на відхилення. Поєднання стандартизованих процедур із моніторингом, оперативним контролем, коригувальними діями та автоматизованими системами управління дає змогу забезпечити стабільну якість продукції, підвищити ефективність виробництва та створити необхідні умови для підтвердження відповідності продукції національним і міжнародним вимогам.

$$UCL/LCL = \bar{X} \pm A2 \cdot \bar{R} \quad (1)$$

де UCL/LCL- верхня та нижня контрольні межі контрольної карти Шухарта для середніх значень вибірок; $\bar{X}$ – загальне середнє контрольованого параметра; $\bar{R}$ – середній розмах у вибірках; A2 – табличний коефіцієнт, що залежить від обсягу вибірки.

$$C_p = (USL - LSL) / (6 \cdot \sigma) \quad (2)$$

де C_p - індекс відтворюваності процесу (process capability); USL, LSL – верхня та нижня межі допуску на контрольований показник; σ – середньоквадратичне відхилення показника процесу. Значення $C_p \geq 1,33$ зазвичай вважається задовільним для стабільного технологічного процесу.



Рисунок 6.1 – Приклад контрольної карти Шухарта технологічного параметра процесу

Контрольні питання

1. Що таке система управління якістю і на яких принципах вона ґрунтується (цикл PDCA)?
2. У чому різниця між оперативним контролем і моніторингом технологічного процесу?
3. Які коригувальні дії застосовуються за виявлення відхилень параметрів процесу?
4. Яку роль відіграє стандартизація технологічних процесів в управлінні якістю?
5. Що показує індекс відтворюваності процесу C_p і як він обчислюється?

ЛЕКЦІЯ 7. Технологічні параметри виробничих процесів та їх вплив

1. Основні технологічні параметри
2. Вплив параметрів на продуктивність
3. Зв'язок параметрів і якості
4. Регулювання режимів роботи
5. Оптимальні значення параметрів

Ключові слова: технологічні параметри (*technological parameters*); продуктивність (*productivity*); якість (*quality*); режим (*mode*); оптимізація (*optimization*)

1. Основні технологічні параметри

Технологічні параметри – це кількісні характеристики режиму роботи обладнання та умов виконання технологічної операції, які безпосередньо визначають перебіг технологічного процесу, продуктивність обладнання, якість отриманого результату та рівень використання матеріальних, енергетичних і трудових ресурсів. Вони є важливим інструментом оцінювання та регулювання роботи машин і механізмів у системі агропромислового виробництва. Кожен параметр має номінальне (розрахункове) значення та допустимий діапазон відхилень, перевищення якого призводить до погіршення якості виконання операції або надмірних витрат ресурсів.

До основних технологічних параметрів обладнання АПВ належать швидкісні, силові, режимні та геометричні параметри. Швидкісні параметри характеризують інтенсивність руху та обертання робочих органів. До них належать частота обертання валів і робочих органів, лінійна швидкість руху машини або агрегату, швидкість подачі матеріалу, швидкість переміщення робочих органів тощо. Наприклад, підвищення частоти обертання робочого органу може збільшити продуктивність машини, проте одночасно призвести до збільшення енергоспоживання, механічного пошкодження продукції, вібрації та зношування деталей.

Силові параметри характеризують навантаження на робочі органи, приводи та конструктивні елементи обладнання. До них

належать тиск, тягове зусилля, крутний момент, потужність приводу, навантаження на робочі органи та опір переміщенню. Контроль силових параметрів необхідний для запобігання перевантаженню обладнання, аварійним режимам роботи та передчасному зношуванню його елементів.

Параметри режиму роботи визначають умови, за яких відбувається технологічний вплив на оброблюваний матеріал. До них належать температура, тривалість технологічного впливу або витримки, вологість матеріалу, витрата повітря чи теплоносія, тиск, концентрація робочої речовини та інші показники. Наприклад, під час сушіння зерна температура теплоносія та тривалість сушіння безпосередньо впливають на кінцеву вологість продукції та її якість.

Геометричні параметри робочих органів визначають їх конструктивне положення та взаємодію з оброблюваним матеріалом. До них належать зазори між робочими поверхнями, кути встановлення та атаки, глибина занурення, ширина захвату, діаметр і довжина робочих органів, відстань між елементами тощо. Навіть незначна зміна геометричних параметрів може суттєво вплинути на характер технологічного процесу.

Кожен технологічний параметр має номінальне (розрахункове) значення, яке відповідає оптимальному або рекомендованому режиму роботи обладнання. Фактичне значення параметра під час експлуатації може відхилятися від номінального через зміни властивостей сировини, навантаження на обладнання, зношування робочих органів, коливання температури та вологості навколишнього середовища, нестабільність енергопостачання або інші фактори.

Для кожного параметра встановлюється допустимий діапазон відхилень, у межах якого технологічний процес забезпечує необхідну якість та прийнятний рівень ресурсних витрат. Загалом це можна представити як:

$$X_{\min} \leq X \leq X_{\max},$$

де X – фактичне значення технологічного параметра; $X_{\min}$ та $X_{\max}$ – відповідно мінімально та максимально допустимі його значення.

Вихід параметра за межі допустимого діапазону може мати негативні наслідки. Надмірне збільшення швидкості, температури, тиску або навантаження може спричинити погіршення якості продукції, збільшення втрат, підвищення питомих енерговитрат, механічне пошкодження матеріалу, перевантаження приводу та прискорене зношування обладнання. Водночас надмірне зменшення параметрів може призвести до зниження продуктивності та нерационального використання робочого часу.

Таким чином, оптимальний технологічний режим полягає не в максимальному збільшенні окремого параметра, а у встановленні такого їх поєднання, за якого забезпечуються задана якість технологічної операції, необхідна продуктивність, мінімальні втрати та раціональні витрати енергії й інших ресурсів.

Взаємозв'язок можна представити у вигляді ланцюга:

технологічний параметр → режим роботи обладнання → перебіг технологічного процесу → результат операції → показники якості → ресурсні витрати → економічна ефективність.

Отже, контроль, регулювання та оптимізація технологічних параметрів є однією з основних умов ефективної експлуатації обладнання АПВ та забезпечення стабільності технологічних процесів.

2. Вплив параметрів на продуктивність

Залежність продуктивності технологічного обладнання від режимного параметра, як правило, має екстремальний характер: за низьких значень параметра (наприклад, швидкості) продуктивність обмежується недовикористанням потужності обладнання, тоді як за надмірно високих значень зростають втрати часу на усунення відмов, повторну обробку або компенсацію погіршення якості. Це зумовлює існування раціонального (оптимального) діапазону значень параметра, у якому досягається максимальна продуктивність за прийнятною якістю.

Залежність продуктивності технологічного обладнання від режимного параметра у більшості випадків має нелінійний, часто екстремальний характер. Це означає, що зі зміною певного режимного параметра продуктивність спочатку зростає, досягає максимального значення, а після перевищення певної межі починає знижуватися. Такий характер залежності пояснюється взаємодією продуктивності, якості технологічної операції, надійності обладнання та ресурсних витрат.

За низьких значень режимного параметра, наприклад швидкості руху агрегату, частоти обертання робочого органу або подачі матеріалу, обладнання використовується не повною мірою. Робочі органи мають недостатню інтенсивність впливу, зменшується кількість матеріалу, що обробляється за одиницю часу, а частина потенційної потужності обладнання залишається невикористаною. У результаті фактична продуктивність є нижчою за можливу, а питомі витрати часу та енергії на одиницю продукції можуть збільшуватися.

Зі збільшенням режимного параметра інтенсивність технологічного процесу зростає. Наприклад, підвищення швидкості руху агрегату збільшує площу обробки за одиницю часу, а збільшення частоти обертання робочого органу може підвищувати інтенсивність оброблення матеріалу. На цьому етапі продуктивність обладнання зростає, а його встановлена потужність використовується більш ефективно.

Проте після досягнення певного значення параметра подальше його збільшення може мати негативний вплив на продуктивність. Надмірна швидкість, частота обертання або подача матеріалу можуть спричинити перевантаження робочих органів, збільшення вібрацій, зростання ймовірності відмов, заклинювання, забивання технологічних каналів та прискорене зношування деталей. Одночасно погіршується якість виконання технологічної операції, збільшується кількість браку, втрат або пошкодженої продукції.

У результаті значна частина робочого часу може витрачатися не безпосередньо на виконання технологічної операції, а на усунення

відмов, очищення та регулювання обладнання, технічне обслуговування, повторну обробку матеріалу або компенсацію погіршення якості. Тому фактична експлуатаційна продуктивність може почати знижуватися навіть за формального підвищення інтенсивності роботи обладнання.

Залежність можна умовно представити у вигляді кривої:

Продуктивність → зростання → максимум → зниження

де максимум відповідає раціональному значенню режимного параметра.

Важливо враховувати, що максимальна технічна продуктивність не завжди відповідає оптимальній продуктивності. Режим, за якого обладнання забезпечує найвищу пропускну здатність, може супроводжуватися надмірними енерговитратами, втратами продукції, зниженням її якості або підвищеним зношуванням обладнання.

Тому під час вибору режиму роботи необхідно одночасно враховувати кілька взаємопов'язаних показників: продуктивність, якість виконання операції, питомі енерговитрати, втрати продукції, надійність обладнання та собівартість процесу.

Раціональний режим роботи визначається як такий діапазон значень параметра, у якому забезпечується необхідна продуктивність за умови дотримання встановлених вимог до якості та допустимого рівня ресурсних витрат. У практичних умовах доцільно орієнтуватися не на одну точку максимального значення продуктивності, а на оптимальний діапазон, у межах якого процес залишається достатньо стабільним навіть за незначних змін властивостей сировини, навантаження або зовнішніх умов.

Наприклад, для зерноочисної машини збільшення подачі зерна спочатку підвищує продуктивність. Однак за надмірної подачі робочі органи не встигають якісно розділяти компоненти зернової маси, зростає кількість домішок у очищеному зерні та втрати повноцінного зерна. Отже, найбільша подача не обов'язково забезпечує найкращий технологічний результат.

Для сушарки зерна аналогічна закономірність може спостерігатися залежно від температури теплоносія або його витрати. Збільшення температури прискорює процес сушіння, але надмірне підвищення температури може призвести до пересушування, погіршення якості зерна, пошкодження його технологічних властивостей та збільшення енергетичних витрат.

Таким чином, оптимізація режимних параметрів технологічного обладнання повинна базуватися на комплексному оцінюванні результатів процесу. Оптимальним є не максимальне значення окремого режимного параметра, а таке його значення або діапазон, за якого досягається найкраще співвідношення між продуктивністю, якістю, надійністю та ресурсоефективністю.

У загальному вигляді критерій вибору режиму можна сформулювати так:

максимальна продуктивність + задана якість + мінімальні втрати + раціональні енерговитрати + надійна робота обладнання.

Саме тому встановлення та підтримання оптимального діапазону режимних параметрів є важливою складовою управління технологічними процесами та підвищення ефективності обладнання АПВ.

3. Зв'язок параметрів і якості

Технологічні параметри процесу та показники якості кінцевої продукції пов'язані, як правило, нелінійною залежністю: зміна одного параметра може одночасно позитивно впливати на одні показники якості та негативно – на інші (наприклад, підвищення швидкості обробітку ґрунту збільшує продуктивність, але погіршує якість кришення). Управління якістю передбачає пошук компромісного (оптимального) співвідношення параметрів, що забезпечує задані вимоги до кількох показників якості одночасно.

Технологічні параметри процесу та показники якості кінцевої продукції пов'язані між собою складними, переважно нелінійними залежностями. Це означає, що зміна одного режимного параметра може по-різному впливати на окремі характеристики технологічного процесу та кінцевого продукту. У реальних виробничих умовах

практично неможливо змінити один параметр, не вплинувши одночасно на продуктивність, енерговитрати, втрати, надійність обладнання та кілька показників якості.

Характер впливу параметра залежить від його величини та конкретних умов виконання технологічної операції. У певному діапазоні збільшення параметра може покращувати якість, а після досягнення певної межі – призводити до її погіршення. Тому для більшості технологічних процесів існує область раціональних значень параметрів, у межах якої забезпечується необхідна якість продукції за прийнятних ресурсних витрат.

Наприклад, підвищення швидкості обробітку ґрунту дає змогу збільшити продуктивність агрегату та зменшити витрати часу на виконання операції. Проте надмірне збільшення швидкості може зменшити якість кришення ґрунту, погіршити рівномірність обробітку, збільшити нерівномірність глибини та підвищити тягове навантаження на агрегат. Таким чином, позитивний ефект від підвищення продуктивності супроводжується можливим погіршенням окремих показників якості.

Аналогічна ситуація спостерігається під час очищення зерна. Збільшення подачі зернового матеріалу через машину може підвищити її продуктивність, однак за надмірної подачі скорочується час перебування матеріалу в робочій зоні, погіршується розділення компонентів зернової маси та можуть зростати втрати повноцінного зерна. Отже, максимальна продуктивність машини не обов'язково відповідає найвищій якості очищення.

Під час сушіння зерна підвищення температури теплоносія, як правило, прискорює видалення вологи та скорочує тривалість процесу. Водночас надмірна температура може спричинити перегрівання зерна, погіршення його технологічних властивостей, нерівномірне сушіння та додаткові енергетичні витрати. Тому необхідно визначати та підтримувати такий температурний режим, який забезпечує необхідну кінцеву вологість без погіршення якості продукції.

Особливістю управління технологічною якістю є те, що кінцева продукція характеризується сукупністю показників, які необхідно забезпечити одночасно. Наприклад, для зерна можуть одночасно нормуватися вологість, чистота, рівень травмування, температура після сушіння та втрати; для посіву – глибина загортання насіння, рівномірність його розподілу та польова схожість; для обробітку ґрунту – глибина, ступінь кришення, рівномірність поверхні та відсутність пропусків.

У такій ситуації покращення одного показника може супроводжуватися погіршенням іншого. Саме тому управління якістю не зводиться до максимізації одного окремого показника. Його основним завданням є пошук такого поєднання технологічних параметрів, за якого всі основні вимоги до кінцевої продукції виконуються одночасно.

Цей процес можна представити у вигляді послідовності:

технологічні параметри → режим роботи обладнання → технологічний вплив → показники якості → оцінювання результату → коригування параметрів.

Для кожного показника якості встановлюються нормативні або допустимі межі:

$$Q_{\min} \leq Q \leq Q_{\max},$$

де Q – фактичне значення показника якості; $Q_{\min}$ і $Q_{\max}$ – його допустимі нижня та верхня межі.

Якщо фактичне значення виходить за встановлені межі, необхідно скоригувати режим роботи обладнання. Наприклад, можна змінити швидкість руху, частоту обертання робочого органу, подачу матеріалу, температуру, тиск, зазор або інший параметр.

Особливого значення набуває багатокритеріальна оптимізація, оскільки під час функціонування технологічного обладнання необхідно одночасно враховувати кілька взаємопов'язаних критеріїв. До них належать:

- ✓ продуктивність обладнання;
- ✓ якість кінцевої продукції;
- ✓ питомі енерговитрати;

- ✓ технологічні втрати;
- ✓ пошкодження продукції;
- ✓ надійність обладнання;
- ✓ тривалість технологічної операції;
- ✓ експлуатаційні витрати.

Отже, оптимальним слід вважати не режим із максимальним значенням одного показника, а компромісний режим, який забезпечує виконання встановлених вимог до якості за мінімально необхідних ресурсних витрат і прийнятної продуктивності.

У сучасному обладнанні АПВ для пошуку та підтримання такого режиму застосовують системи автоматичного контролю та регулювання. Датчики визначають фактичні значення температури, вологості, навантаження, швидкості, тиску та інших параметрів. Система керування порівнює отримані значення із заданими та за необхідності автоматично коригує режим роботи обладнання.

Таким чином, управління якістю технологічного процесу є процесом постійного узгодження технологічних параметрів із вимогами до кінцевої продукції. Ефективне управління передбачає визначення взаємозв'язків між параметрами процесу та показниками якості, встановлення допустимих меж, пошук раціонального режиму та його підтримання в умовах зміни властивостей сировини й навантаження на обладнання. Основний принцип можна сформулювати так: не максимальний режим роботи обладнання, а оптимальне співвідношення «продуктивність – якість – ресурсні витрати» визначає ефективність технологічного процесу.

4. Регулювання режимів роботи

Регулювання технологічних параметрів здійснюється як на етапі налаштування обладнання перед початком роботи (попереднє регулювання), так і в процесі роботи за даними оперативного контролю (адаптивне регулювання). Сучасні системи точного землеробства та автоматизовані технологічні лінії дедалі частіше застосовують автоматичне регулювання параметрів у реальному часі на основі даних датчиків, що суттєво підвищує стабільність показників якості.

Регулювання технологічних параметрів є важливою складовою управління технологічним процесом і спрямоване на забезпечення стабільності режиму роботи обладнання, необхідної продуктивності та заданих показників якості кінцевої продукції. Під час експлуатації обладнання фактичні умови технологічного процесу можуть змінюватися, тому одноразового встановлення параметрів перед початком роботи часто недостатньо.

Залежно від моменту та способу здійснення розрізняють попереднє, оперативне та адаптивне регулювання.

Попереднє регулювання здійснюється на етапі підготовки обладнання до роботи. Його метою є встановлення початкових значень технологічних параметрів відповідно до властивостей оброблюваного матеріалу, типу технологічної операції та вимог до кінцевого результату. На цьому етапі встановлюють частоту обертання робочих органів, зазори, кути встановлення, робочу швидкість, глибину обробітку, температуру, подачу матеріалу та інші параметри.

Наприклад, перед роботою зерноочисної машини налаштовують зазори, повітряний потік, положення робочих органів і продуктивність подачі зернової маси. Для ґрунтообробного агрегату встановлюють необхідну глибину обробітку, швидкість руху та положення робочих органів. Правильне попереднє налаштування створює початкові умови для стабільного перебігу технологічного процесу.

Проте властивості сировини, ґрунту або іншого об'єкта обробки можуть змінюватися безпосередньо під час виконання операції. Наприклад, зернова маса може мати різну вологість і засміченість, а ґрунт – різну твердість, вологість та структуру на окремих ділянках поля. У таких умовах фіксований режим не завжди забезпечує однакову якість результату.

Тому застосовується оперативне регулювання, яке передбачає зміну параметрів безпосередньо під час роботи обладнання відповідно до результатів поточного контролю. Оператор або система керування оцінює фактичний стан процесу та вносить

необхідні корективи. Регулюватися можуть швидкість руху, частота обертання, подача матеріалу, температура, тиск, повітряний потік, глибина обробітку та інші параметри.

Більш досконалим є адаптивне регулювання, за якого система автоматично визначає зміни умов технологічного процесу та відповідно коригує режим роботи обладнання. Основою такого регулювання є використання датчиків, засобів вимірювання, контролерів та алгоритмів автоматичного керування.

Загальна схема адаптивного регулювання може бути представлена так: вимірювання параметра → передавання інформації → аналіз відхилення → прийняття рішення → зміна режиму → контроль результату.

Наприклад, під час сушіння зерна датчики можуть контролювати температуру та вологість матеріалу. Якщо система виявляє відхилення від заданих значень, автоматично змінюється температура або витрата теплоносія. Це дає змогу підтримувати необхідну кінцеву вологість і запобігати пересушуванню або недосушуванню продукції.

У системах точного землеробства автоматичне регулювання використовується для врахування просторової неоднорідності ґрунту та стану посівів. На основі даних навігаційних систем, карт урожайності, датчиків, супутникових знімків та інших джерел інформації можуть автоматично змінюватися норма висіву, дозування добрив і засобів захисту рослин, швидкість руху агрегату та інші параметри.

В автоматизованих технологічних лініях аналогічний принцип застосовується для підтримання стабільної продуктивності та якості продукції. Датчики безперервно контролюють параметри процесу, а система керування порівнює фактичні значення із заданими. У разі виникнення відхилення формується керуючий сигнал, який змінює режим роботи відповідного виконавчого механізму.

Особливе значення має регулювання в реальному часі. На відміну від періодичного ручного контролю, автоматизована система може здійснювати вимірювання та корекцію параметрів

практично безперервно. Це дозволяє швидко реагувати на зміни умов роботи та зменшувати тривалість перебування обладнання в неоптимальному режимі.

Основними перевагами автоматичного та адаптивного регулювання є:

- ✓ підвищення стабільності технологічного процесу;
- ✓ зменшення відхилень показників якості;
- ✓ скорочення технологічних втрат;
- ✓ раціональне використання енергії та матеріальних ресурсів;
- ✓ зниження впливу людського фактора;
- ✓ підвищення продуктивності обладнання;
- ✓ зменшення перевантажень і зношування робочих органів;
- ✓ можливість оперативного реагування на зміну властивостей оброблюваного матеріалу.

Водночас ефективність автоматичного регулювання залежить від точності датчиків, швидкодії системи керування, правильності встановлення заданих значень та якості алгоритмів регулювання. Неправильно заданий режим або неточні вимірювання можуть призвести до небажаних корекцій і, навпаки, погіршити результат технологічної операції.

Отже, сучасне регулювання технологічних параметрів переходить від простого встановлення фіксованого режиму до динамічного адаптивного керування, яке враховує фактичний стан технологічного процесу. Це особливо важливо для аграрного виробництва, де природна неоднорідність ґрунту, сировини та біологічних об'єктів не дає змоги ефективно використовувати однаковий режим роботи в усіх умовах.

Таким чином, поєднання попереднього налаштування, оперативного контролю та автоматичного адаптивного регулювання забезпечує більш високу стабільність технологічних процесів і дає змогу підтримувати задане співвідношення між продуктивністю, якістю та ресурсоефективністю.

Ключовий принцип можна сформулювати так: «Вимірювати → порівнювати → регулювати → контролювати результат».

Класифікація способів регулювання технологічних параметрів

За способом впливу на технологічний процес регулювання можна класифікувати за кількома основними ознаками.

1. За моментом здійснення регулювання:

- **попереднє (початкове)** – виконується до початку роботи обладнання шляхом встановлення заданих значень параметрів;
- **оперативне** – здійснюється безпосередньо під час роботи для усунення виявлених відхилень;
- **адаптивне** – передбачає автоматичну зміну режиму відповідно до поточних змін властивостей об'єкта та умов процесу;
- **післяопераційне** – виконується за результатами аналізу якості продукції для коригування параметрів наступного циклу роботи.

2. За участю оператора:

- **ручне** – параметри змінює оператор за допомогою механічних або електронних органів керування;
- **напівавтоматичне** – система контролює параметри та сигналізує про відхилення, а рішення про коригування приймає оператор;
- **автоматичне** – вимірювання, порівняння та зміна параметрів здійснюються системою керування без безпосередньої участі оператора.

3. За принципом формування керуючого впливу:

- **за відхиленням** – система порівнює фактичне значення параметра із заданим і формує коригувальний вплив у разі виникнення помилки;
- **за збуренням** – параметр змінюється у відповідь на виявлену зміну зовнішньої умови ще до появи значного відхилення результату;
- **комбіноване** – одночасно використовуються інформація про відхилення та дані про збурення.

Наприклад, у зерносушарці система може не лише реагувати на зміну вологості зерна, а й заздалегідь коригувати режим при зміні температури теплоносія або продуктивності подачі.

4. За характером зміни регульованого параметра:

- **ступінчасте** – параметр змінюється дискретно, окремими встановленими значеннями;
- **плавне** – параметр змінюється поступово в заданому діапазоні;
- **циклічне** – параметр змінюється відповідно до періодично повторюваного алгоритму;
- **програмне** – параметр змінюється за попередньо заданою програмою залежно від часу або етапу технологічного процесу.

5. За кількістю параметрів, що регулюються:

- **однопараметричне** – регулюється один основний параметр;
- **багатопараметричне** – одночасно регулюється декілька взаємопов'язаних параметрів;
- **комплексне** – система оптимізує сукупність параметрів з урахуванням продуктивності, якості, енерговитрат та інших критеріїв.

Для сучасного обладнання АПВ найбільш характерним є **багатопараметричне автоматичне регулювання**, оскільки зміна одного параметра часто впливає на інші характеристики процесу.

6. За наявністю зворотного зв'язку:

- **розімкнене регулювання** – керуючий вплив формується без контролю фактичного результату технологічної операції;
- **замкнене регулювання** – фактичний результат вимірюється та порівнюється із заданим значенням, після чого формується коригувальний вплив;
- **адаптивне замкнене регулювання** – система не лише усуває поточні відхилення, а й пристосовує алгоритм керування до зміни властивостей об'єкта та умов роботи.

Для агротехнологічних процесів особливо важливим є **замкнене та адаптивне регулювання**, оскільки властивості ґрунту,

зерна, насіння та іншої сільськогосподарської продукції можуть істотно змінюватися під час роботи.

Узагальнено класифікацію можна представити у вигляді схеми:

СПОСОБИ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

→ **за часом:** попереднє • оперативне • адаптивне • післяопераційне

→ **за участю оператора:** ручне • напівавтоматичне • автоматичне

→ **за принципом:** за відхиленням • за збуренням • комбіноване

→ **за характером зміни:** ступінчасте • плавне • циклічне • програмне

→ **за кількістю параметрів:** одно- • багато- • комплексне

→ **за зворотним зв'язком:** розімкнене • замкнене • адаптивне замкнене

Таким чином, вибір способу регулювання залежить від складності технологічного процесу, характеру зміни його параметрів, необхідної точності підтримання режиму, швидкості виникнення відхилень, вартості обладнання та вимог до якості кінцевої продукції.

Для сучасного обладнання АПВ найбільш перспективним є поєднання **автоматичного, багатопараметричного, замкненого та адаптивного регулювання**, яке дає змогу підтримувати оптимальний режим роботи в умовах постійної зміни властивостей сировини та зовнішнього середовища.

5. Оптимальні значення параметрів

Визначення оптимальних значень технологічних параметрів здійснюється на основі математичних моделей залежності показників продуктивності та якості від параметрів режиму, отриманих за результатами багатофакторних експериментів. Оптимальне значення параметра відповідає екстремуму (максимуму чи мінімуму) цільової функції за умови дотримання обмежень на допустимі значення показників якості та технічних можливостей обладнання.

$$Q = Q(v, h, \dots) \quad (1)$$

де Q - продуктивність технологічного процесу як функція режимних параметрів (швидкості v , глибини обробітку h та ін.); конкретний вигляд залежності встановлюється експериментально або аналітично для кожного типу обладнання.

$$dQ/dv = 0 \rightarrow v_{\text{опт}} \quad (2)$$

це умова існування екстремуму продуктивності за швидкісним параметром; розв'язання цього рівняння відносно v дає оптимальне значення параметра $v_{\text{опт}}$, за якого продуктивність максимальна.

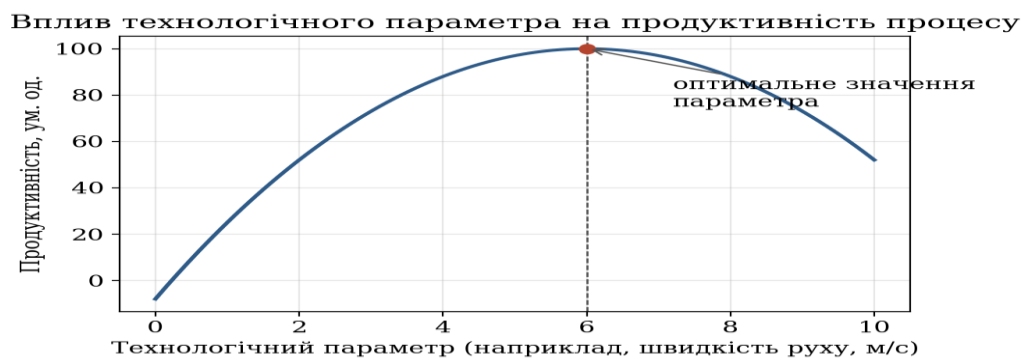


Рисунок 6.1 – Типова залежність продуктивності технологічного процесу від режимного параметра

Визначення оптимальних значень технологічних параметрів є одним із основних завдань управління технологічними процесами в агропромисловому виробництві. Оптимізація дає змогу встановити такі режими роботи обладнання, за яких забезпечується необхідна якість кінцевої продукції, досягається задана або максимальна продуктивність і водночас раціонально використовуються енергетичні, матеріальні та трудові ресурси.

Основою оптимізації є встановлення **кількісної залежності між технологічними параметрами та результатами технологічної операції**. Для цього використовують математичні моделі, які описують залежність показників продуктивності, якості, енерговитрат, втрат та інших характеристик процесу від основних факторів і режимних параметрів.

Такі моделі отримують, як правило, за результатами **експериментальних досліджень**, у тому числі багатфакторних експериментів. На відміну від однофакторних дослідів,

багатофакторний експеримент дає змогу одночасно досліджувати вплив декількох параметрів та встановлювати не тільки їх індивідуальний вплив, а й взаємодію між ними.

Наприклад, під час дослідження зерноочисної машини факторами можуть бути:

- X_1 – продуктивність подачі зернової маси;
- X_2 – швидкість повітряного потоку;
- X_3 – частота коливань або обертання робочого органу;
- X_4 – розмір отворів решета.

Результативними показниками при цьому можуть бути продуктивність машини, ступінь очищення зерна, втрати повноцінного зерна та питомі енерговитрати.

За результатами експериментів формується математична модель, наприклад регресійного типу:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + \dots,$$

де Y – досліджуваний показник процесу; $X_1, X_2, \dots$ – технологічні параметри; $b_0, b_1, b_2, \dots$ – коефіцієнти математичної моделі.

Квадратичні та перехресні члени моделі дають змогу врахувати **нелінійний характер залежності** та взаємний вплив технологічних параметрів. Це особливо важливо для агротехнологічних процесів, оскільки підвищення одного параметра може бути ефективним лише до певної межі.

Для визначення оптимального режиму спочатку необхідно сформулювати **цільову функцію**. Вона визначає, який показник потрібно максимізувати або мінімізувати.

Наприклад:

- максимізація продуктивності: $Y \rightarrow \max$;
- мінімізація питомих енерговитрат: $E_s \rightarrow \min$;
- мінімізація втрат продукції: $L \rightarrow \min$;
- максимізація якості очищення: $Q \rightarrow \max$;
- мінімізація собівартості: $C \rightarrow \min$.

У реальному виробництві оптимізація часто має **багатокритеріальний характер**. Необхідно одночасно забезпечити високу продуктивність, необхідну якість, мінімальні втрати та прийнятні енерговитрати. Тому максимальне значення одного показника не завжди є оптимальним для всього процесу.

Наприклад, збільшення швидкості руху агрегату може підвищити його продуктивність, але одночасно погіршити якість обробітку ґрунту та збільшити витрати палива. У цьому випадку оптимальним буде не максимальна швидкість, а така її величина, за якої продуктивність є достатньо високою, а якість обробітку відповідає встановленим вимогам.

Оптимізація здійснюється **за наявності системи обмежень**. До них належать технологічні, якісні, технічні, енергетичні та економічні обмеження.

Загальна постановка задачі може бути представлена у вигляді:

$$Y(X_1, X_2, \dots, X_n) \rightarrow \max \text{ (або } \min \text{)}$$

за умов:

$$X_{i\min} \leq X_i \leq X_{i\max};$$

$$Q_{j\min} \leq Q_j \leq Q_{j\max};$$

$$P \leq P_{\max},$$

де X_i – технологічні параметри; Q_j – показники якості; P – навантаження або потужність обладнання.

Отже, **оптимальне значення технологічного параметра** визначається не ізольовано, а в межах допустимої області режимів. Точка математичного екстремуму може бути непридатною для практичного використання, якщо вона виходить за межі технічних можливостей обладнання або призводить до порушення вимог до якості продукції.

Важливим етапом є визначення **області допустимих режимів**. Вона являє собою сукупність значень технологічних параметрів, за яких усі встановлені обмеження виконуються одночасно. Саме в цій області здійснюється пошук оптимального режиму.

Процес визначення оптимальних параметрів можна представити так:

планування експерименту → проведення досліджень → отримання експериментальних даних → побудова математичної моделі → перевірка адекватності моделі → визначення цільової функції → встановлення обмежень → пошук екстремуму → експериментальна перевірка → вибір оптимального режиму.

Після отримання математичної моделі необхідно перевірити її **адекватність**, тобто відповідність розрахункових результатів експериментальним даним. Якщо модель достатньо точно описує досліджуваний процес, її можна використовувати для прогнозування результатів за різних значень параметрів.

Особливе значення має **експериментальна перевірка оптимального режиму**. Розрахункове значення параметрів необхідно перевірити в реальних виробничих умовах. Це дає змогу встановити, чи забезпечує оптимальний режим прогнозовану продуктивність та якість, а також чи відповідають фактичні ресурсні витрати розрахунковим.

У практичній експлуатації доцільно встановлювати не лише одну оптимальну точку, а **раціональний діапазон параметрів**. Це пояснюється тим, що реальні умови постійно змінюються, а точне підтримання одного значення параметра може бути технічно складним або економічно недоцільним.

Наприклад, якщо математична модель показує максимальну продуктивність при швидкості руху агрегату 8,2 км/год, практично може бути доцільно встановити робочий діапазон 7,8–8,5 км/год, у якому продуктивність залишається високою, а якість роботи та навантаження на обладнання відповідають нормативним вимогам.

Таким чином, математична оптимізація дає можливість перейти від емпіричного вибору режимів роботи обладнання до **обґрунтованого визначення технологічних параметрів на основі кількісних залежностей**. Використання математичних моделей дозволяє прогнозувати результат технологічної операції, оцінювати вплив окремих параметрів, визначати їх оптимальні значення та обґрунтовувати режими роботи обладнання.

У загальному вигляді завдання можна сформулювати як пошук такого вектора технологічних параметрів:

$$X = (X_1, X_2^*, \dots, X_n^*), **$$

за якого цільова функція досягає оптимального значення, а всі встановлені технологічні, якісні, технічні та ресурсні обмеження виконуються.

Отже, оптимальний технологічний режим – це не просто математичний екстремум, а практично реалізований режим роботи обладнання, який забезпечує найкраще співвідношення «продуктивність – якість – ресурсні витрати» в межах допустимих технічних можливостей.

Контрольні питання

1. Назвіть основні групи технологічних параметрів обладнання АПВ.
2. Чому залежність продуктивності від режимного параметра має екстремальний характер?
3. Як пов'язані технологічні параметри процесу з показниками якості продукції?
4. Які існують способи регулювання режимів роботи обладнання?
5. Як визначається оптимальне значення технологічного параметра?

ЛЕКЦІЯ 8. Комплексна оптимізація, стабільність та прийняття інженерних рішень в агроінженерії

1. Комплексна оптимізація технологічних параметрів
2. Стабільність і надійність технологічних процесів та обладнання
3. Прогнозування та управління якістю технологічних процесів
4. Прийняття інженерних рішень на основі результатів оптимізації
5. Комплексне управління «якість – параметри – надійність – ресурси»

Ключові слова: оптимізація (optimization); критерій (criterion); ресурси (resources); ефективність (efficiency)

1. Комплексна оптимізація технологічних параметрів

Сучасне аграрне виробництво характеризується постійним ускладненням технологічних процесів, підвищенням вимог до якості продукції, необхідністю раціонального використання енергетичних і матеріальних ресурсів та забезпечення надійної роботи машин і обладнання. У попередніх лекціях було розглянуто технологічні параметри виробничих процесів, їхній вплив на продуктивність і якість продукції, методи контролю та управління якістю, а також способи оптимізації технологічних режимів. Однак визначення оптимального параметра саме по собі ще не забезпечує ефективної роботи виробничої системи. У реальних умовах технологічні параметри постійно змінюються під впливом зовнішніх факторів, властивостей сировини, технічного стану обладнання та режиму його експлуатації. Тому сучасний підхід передбачає послідовне вирішення взаємопов'язаних завдань:

оптимізація параметрів → забезпечення стабільності → прогнозування якості → прийняття інженерного рішення → комплексне управління системою.

Саме такий підхід дає можливість перейти від окремого регулювання машин до системного управління якістю та ефективністю технологічного процесу.

У технологічному процесі одночасно змінюється значна кількість параметрів. Кожен із них може впливати не на один, а одразу на декілька результативних показників.

Наприклад, збільшення швидкості руху машинно-тракторного агрегату може:

- підвищити продуктивність;
- зменшити витрати часу на виконання операції;
- збільшити навантаження на двигун;
- підвищити витрати палива за одиницю часу;
- погіршити якість виконання технологічної операції;
- збільшити нерівномірність оброблення.

Тому просте максимізування швидкості не означає оптимізації процесу.

Комплексна оптимізація технологічних параметрів – це визначення такого поєднання параметрів технологічного процесу, яке забезпечує найкращий сукупний результат за заданих технічних, технологічних, ресурсних та економічних обмежень.

У загальному вигляді технологічний процес можна представити:

$$Y=f(X_1,X_2,\dots,X_n),$$

де $X_1,X_2,\dots,X_n$ – технологічні параметри, а Y – результативний показник процесу.

Результатом може бути:

- продуктивність;
- якість продукції;
- втрати;
- енергоспоживання;
- собівартість;
- тривалість процесу;
- надійність обладнання.

Основними критеріями оптимізації в агроінженерії є:

1. Продуктивність $P \rightarrow \max$

Необхідно забезпечити максимально можливий обсяг виконаної роботи за одиницю часу.

2. Якість $Q \rightarrow \max$

Наприклад, необхідно забезпечити максимальний ступінь очищення зерна або мінімальну нерівномірність висіву.

3. Втрати $L \rightarrow \min$

4. Енергетичні витрати $E \rightarrow \min$

5. Собівартість $C \rightarrow \min$

6. Зношування обладнання $W \rightarrow \min$

На практиці ці критерії можуть суперечити один одному.

Наприклад, підвищення продуктивності зерноочисної машини може призвести до збільшення втрат зерна. Зниження температури сушіння може зберігати якість продукції, але збільшувати тривалість процесу. Отже, оптимізація повинна передбачати пошук компромісу між декількома критеріями. Якщо необхідно одночасно врахувати декілька критеріїв, використовують багатокритеріальну оптимізацію. У спрощеному вигляді комплексний критерій можна записати:

$$F = w_1 F_1 + w_2 F_2 + \dots + w_n F_n,$$

де:

- F_i F_i – окремий критерій;
- W_i w_i – коефіцієнт вагомості;
- F F – комплексний критерій.

Коефіцієнти вагомості показують, яке значення має кожен критерій для конкретного технологічного процесу.

Наприклад, для сушіння зерна особливого значення набуває якість готової продукції, тому зниження енерговитрат не повинно досягатися за рахунок перегрівання та пошкодження зерна.

Оптимальний режим повинен відповідати технічним можливостям обладнання.

Основні обмеження: $X_{\min} \leq X \leq X_{\max}$

Та $Q_{\min} \leq Q \leq Q_{\max}$.

Наприклад:

- частота обертання не повинна перевищувати допустиму;
- температура не повинна спричиняти пошкодження продукції;

- навантаження двигуна не повинно перевищувати номінальне;
- втрати продукції не повинні перевищувати нормативне значення.

Таким чином, математично найкращий режим може бути неприйнятним у реальних умовах.

У практиці доцільно визначати не лише одну точку оптимуму, а раціональний діапазон параметрів.

Наприклад: $V_{\text{опт}}=8,2\text{км/год}$.

Якщо при швидкості 7,8–8,5 км/год якість роботи залишається допустимою, то саме цей діапазон може бути рекомендований для експлуатації. Це особливо важливо в сільському господарстві, де умови роботи постійно змінюються.

2. Стабільність і надійність технологічних процесів та обладнання

Стабільність технологічного процесу – це здатність процесу протягом визначеного часу забезпечувати встановлені показники якості та продуктивності в допустимих межах.

Наприклад, стабільна робота зерносушарки означає підтримання необхідних:

- температури;
- продуктивності;
- вологості зерна;
- тривалості сушіння;
- витрати енергії.

Стабільність має особливе значення тому, що навіть правильно визначений оптимальний режим може втрачати ефективність при зміні умов експлуатації. Причини відхилень можна поділити на три основні групи.

Технологічні фактори

- зміна вологості сировини;
- неоднорідність матеріалу;
- зміна продуктивності подачі;
- зміна фізико-механічних властивостей продукції.

Зовнішні фактори

- температура навколишнього середовища;
- вологість повітря;
- погодні умови;
- рельєф поля;
- зміна навантаження.

Технічні фактори

- зношування робочих органів;
- зміна зазорів;
- забруднення обладнання;
- послаблення кріплень;
- зношування підшипників;
- погіршення стану приводів;
- порушення регулювань.

Надійність – це здатність обладнання виконувати задані функції, зберігаючи встановлені експлуатаційні характеристики протягом певного часу.

Основними властивостями надійності є:

- безвідмовність;
- довговічність;
- ремонтпридатність;
- збережуваність.

Надійність безпосередньо пов'язана з якістю технологічного процесу. Наприклад: зношування робочого органу → зміна технологічного параметра → погіршення режиму → зниження якості → збільшення втрат.

Отже, управління якістю повинно включати не тільки контроль продукції, але й контроль технічного стану обладнання.

Стабільність технологічного процесу залежить від надійності обладнання. Якщо машина часто зупиняється або змінює режим роботи через технічні несправності, неможливо забезпечити стабільну якість продукції.

Тому система управління повинна забезпечувати:

- своєчасне технічне обслуговування;

- контроль зношування;
- діагностування;
- виявлення несправностей;
- прогнозування технічного стану;
- своєчасне коригування режимів.

3. Прогнозування та управління якістю технологічних процесів

Контроль дозволяє встановити, що відбувається зараз. Прогнозування дає можливість визначити, що може відбутися в майбутньому.

Прогнозування технологічного процесу – це визначення майбутніх значень показників процесу або якості продукції на основі поточних і попередніх даних.

Наприклад, за зміною температури підшипника можна прогнозувати можливість його перегрівання.

За зміною:

- температури сушіння;
- вологості зерна;
- продуктивності;
- тривалості процесу

можна прогнозувати кінцеву вологість зерна.

Для прогнозування використовують:

- результати вимірювань;
- історичні дані;
- технологічні журнали;
- показники датчиків;
- результати лабораторного контролю;
- характеристики технічного стану обладнання.

Важливим є регулярне накопичення інформації.

Чим більше достовірних даних отримано про технологічний процес, тим точніше можна встановити закономірності його функціонування. Для прогнозування можуть використовуватися:

Статистичні методи дозволяють виявляти закономірності зміни параметрів у час та регресійні моделі. Наприклад:

$$Y=a+bX.$$

$$Y=a+bX.Y=a+bX.$$

Для декількох факторів:

$$Y=f(X_1,X_2,\dots,X_n).$$

Імітаційне моделювання

Дає можливість дослідити поведінку технологічної системи за різних умов без безпосереднього проведення всіх експериментів.

Інтелектуальні методи

Можуть використовуватися:

- нейронні мережі;
- машинне навчання;
- нечітка логіка;
- інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень.

Основна перевага прогнозування полягає в можливості попереджувального управління.

Загальна схема: датчики → збір інформації → аналіз → прогнозування → виявлення можливого відхилення → коригування → контроль результату.

Наприклад, якщо система прогнозує перевищення допустимої вологості зерна після сушіння, можна завчасно змінити:

- температуру;
- швидкість руху зерна;
- тривалість сушіння;
- подачу теплоносія.

Таким чином, система не чекає появи дефектної продукції, а попереджає його виникнення.

Сучасне управління технологічними процесами базується на принципі зворотного зв'язку:

вимірювання → порівняння → визначення відхилення → коригування → повторне вимірювання.

Якщо фактичне значення параметра відрізняється від заданого, система формує керуючий вплив.

Наприклад: $e=X_{\text{зад}}-X_{\text{факт}}$,

де:

- Хзад – задане значення;
- Хфакт– фактичне значення;
- е – відхилення.

Чим швидше система виявляє відхилення та реагує на нього, тим вищою може бути стабільність процесу.

4. Прийняття інженерних рішень на основі результатів оптимізації

Інженерне рішення – це обґрунтований вибір певного технічного або технологічного варіанта для досягнення поставленої мети. В агроінженерії такими рішеннями можуть бути:

- вибір машини;
- вибір технологічного режиму;
- встановлення оптимальної швидкості;
- вибір продуктивності;
- налаштування робочих органів;
- зміна режиму сушіння;
- вибір способу транспортування;
- проведення технічного обслуговування;
- модернізація обладнання.

Рішення повинно бути:

- технічно обґрунтованим;
- технологічно доцільним;
- економічно ефективним;
- ресурсоефективним;
- надійним;
- безпечним;
- практично реалізованим.

Неприпустимо обирати режим лише за одним показником.

Наприклад, режим із максимальною продуктивністю може бути відхилений, якщо він:

- погіршує якість;
- збільшує втрати;
- спричиняє перевантаження;
- значно підвищує енергоспоживання;

- прискорює зношування обладнання.

Етап 1. Визначення проблеми

Наприклад: продуктивність машини недостатня, а питомі енерговитрати перевищують допустимий рівень.

Етап 2. Визначення мети

Наприклад: підвищити продуктивність при збереженні необхідної якості та допустимого рівня енергоспоживання.

Етап 3. Визначення критеріїв

Вибираються: продуктивність; якість; втрати; енерговитрати; надійність; собівартість.

Етап 4. Визначення обмежень

Встановлюються допустимі межі технологічних параметрів.

Етап 5. Формування альтернатив

Розглядаються різні режими або технічні варіанти.

Етап 6. Оптимізація

Визначається найкраще поєднання параметрів.

Етап 7. Перевірка

Оптимальний режим перевіряється експериментально або в реальних умовах.

Етап 8. Прийняття рішення

Обирається остаточний варіант.

Етап 9. Упровадження

Рішення реалізується у виробничій системі.

Етап 10. Оцінювання

Фактичні результати порівнюються з очікуваними.

Рішення повинно забезпечувати економічний результат.

Економічний ефект можна визначити:

$$E_{ек} = C_{до} - C_{після},$$

де:

- $C_{до}$ – витрати до впровадження;
- $C_{після}$ – витрати після впровадження.

Якщо необхідні капітальні вкладення:

$$T_{ок} = K / E_{річн},$$

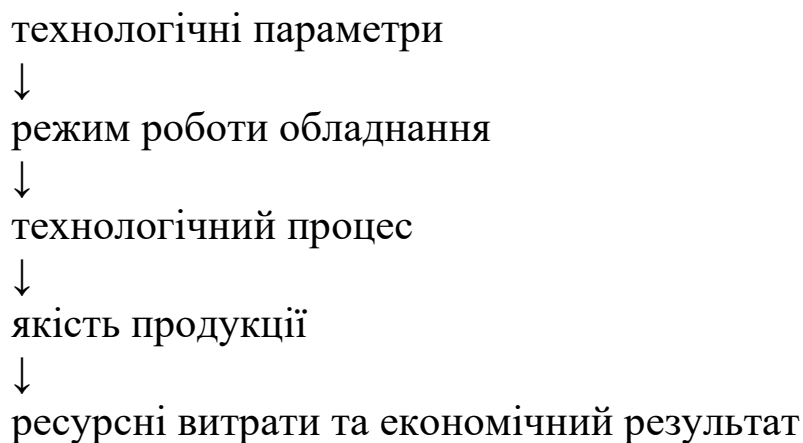
де:

- К – капітальні вкладення;
- Ерічн– річний економічний ефект.

Таким чином, оптимальне інженерне рішення повинно бути не тільки технологічно правильним, але й економічно виправданим.

5. Комплексне управління «якість – параметри – надійність – ресурси» Завершальним етапом розвитку системи управління технологічними процесами є перехід до комплексного управління.

Його сутність полягає в тому, що: якість продукції, технологічні параметри, технічний стан обладнання, надійність та ресурсні витрати розглядаються як взаємопов'язані характеристики однієї системи. У спрощеному вигляді взаємозв'язок можна представити:



При цьому технічний стан обладнання впливає на всі етапи цього ланцюга. Зміна технологічного параметра може безпосередньо змінювати якість. Наприклад: збільшення швидкості → підвищення продуктивності → збільшення навантаження → погіршення якості → зростання витрат.

Тому технологічні параметри повинні підтримуватися в межах, за яких забезпечується необхідний рівень якості. Неправильний режим роботи може призвести до перевантаження обладнання. Наприклад: надмірна подача матеріалу → перевантаження приводу → підвищення температури → прискорене зношування → відмова обладнання.

Отже, оптимізація технологічного параметра одночасно є способом підвищення надійності. Збільшення продуктивності не

завжди означає зниження питомих витрат. Наприклад, надмірне збільшення навантаження може спричинити:

- збільшення споживання електроенергії;
- зростання витрат палива;
- підвищення втрат;
- збільшення кількості відмов;
- зростання витрат на ремонт.

Тому необхідно визначати режим, який забезпечує раціональне використання ресурсів. Таким чином, кінцевою метою є не максимізація одного показника, а оптимальне функціонування всієї технологічної системи.

Повний цикл можна представити так:

1. Вимірювання параметрів
- ↓
2. Контроль якості
- ↓
3. Аналіз технічного стану
- ↓
4. Виявлення відхилень
- ↓
5. Прогнозування
- ↓
6. Оптимізація
- ↓
7. Прийняття інженерного рішення
- ↓
8. Регулювання обладнання
- ↓
9. Оцінювання результату
- ↓
10. Повторний контроль

Таким чином, технологічна система функціонує за принципом безперервного вдосконалення.

Розглянемо зерносушарку. Початково встановлено певний режим сушіння. Під час роботи датчики реєструють: температуру; вологість зерна; продуктивність; витрати теплоносія; енергоспоживання.

Через зміну вологості зерна система виявляє відхилення. Проводиться аналіз і прогнозується, що при збереженні поточного режиму кінцева вологість буде вищою за допустиму.

Система визначає можливі варіанти:

1. збільшити температуру;
2. збільшити тривалість сушіння;
3. зменшити швидкість проходження зерна;
4. змінити подачу теплоносія.

Далі оцінюється кожний варіант за критеріями:

- якість;
- енергоспоживання;
- продуктивність;
- економічна ефективність.

Обирається оптимальний варіант.

Після зміни режиму система повторно контролює показники.

Якщо результат відповідає встановленим вимогам, режим зберігається. Якщо ні – параметри коригуються повторно. Це і є комплексне управління технологічним процесом.

Комплексна оптимізація технологічних параметрів є важливою складовою сучасного управління виробничими процесами в агроінженерії. Її завдання полягає у визначенні оптимального поєднання параметрів, яке забезпечує необхідну якість, продуктивність, надійність та ресурсоефективність.

Визначений оптимальний режим повинен бути стабільним у реальних умовах експлуатації. Для цього необхідно враховувати зміну властивостей сировини, зовнішніх умов та технічного стану обладнання. Надійність обладнання безпосередньо впливає на стабільність технологічного процесу. Своєчасне виявлення зношування та несправностей дозволяє запобігти погіршенню якості продукції та аварійним зупинкам.

Прогнозування дозволяє перейти від реагування на вже виниклі відхилення до їх попередження. Використання датчиків, математичних моделей, статистичних методів та інтелектуальних

систем створює передумови для адаптивного управління технологічними процесами.

Прийняття інженерного рішення повинно базуватися на результатах контролю, аналізу, моделювання, прогнозування та оптимізації. При цьому необхідно враховувати не лише технічні, а й технологічні, економічні та ресурсні фактори.

Таким чином, сучасна система управління технологічним процесом в агроінженерії базується на принципі:

«якість – технологічні параметри – надійність – ресурси – економічна ефективність».

Загальна логіка управління може бути представлена:

Контроль→Аналіз→Прогнозування→Оптимізація→Інженерне рішення→Регулювання→Контроль результату

Саме такий підхід забезпечує перехід від традиційного управління окремими параметрами обладнання до системного, адаптивного та комплексного управління якістю технологічних процесів в агроінженерії.

Контрольні питання

1. Що розуміють під комплексною оптимізацією технологічних параметрів?
2. Які основні критерії використовують під час комплексної оптимізації?
3. Чому максимальна продуктивність не завжди відповідає оптимальному режиму?
4. У чому полягає сутність багатокритеріальної оптимізації?
5. Які обмеження необхідно враховувати під час оптимізації?
6. Що таке стабільність технологічного процесу?
7. Які фактори можуть спричиняти нестабільність технологічного процесу?
8. Що розуміють під надійністю технологічного обладнання?

9. Як технічний стан обладнання впливає на якість продукції?
10. У чому полягає сутність прогнозування якості?
11. Які дані можуть використовуватися для прогнозування технологічних процесів?
12. Які методи прогнозування застосовують в агроінженерії?
13. Що таке інженерне рішення?
14. Які основні етапи прийняття інженерного рішення?
15. Чому під час прийняття рішення необхідно враховувати економічні показники?
16. Як пов'язані між собою технологічні параметри та надійність обладнання?
17. У чому полягає сутність комплексного управління «якість – параметри – надійність – ресурси»?
18. Що таке адаптивне управління технологічним процесом?
19. Яку роль відіграють датчики та системи моніторингу?
20. Якою є загальна послідовність комплексного управління технологічним процесом?

Список використаних джерел:

1. Online optimization of adjustable settings for agricultural machinery assisted by digital twin / D. Guo et al. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024. Vol. 227. Art. 109504. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109504>
2. Rud A. Design and analysis of hydraulic systems for automated agricultural machinery. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*. 2024. Vol. 20, No. 6. P. 121–137. DOI: 10.31548/forest/4.2024.56.
3. Construction method and case study of digital twin system for combine harvester / Y. Yin et al. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024. Vol. 226. Art. 109395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109395>
4. A comprehensive review of recent approaches and Hardware-Software technologies for digitalisation and intellectualisation of Open-Field crop Production: Ukrainian case study in the global context / I. Laktionov et al. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024. Vol. 225. Art. 109326. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109326>.
5. Economic and environmental benefits of digital agricultural technologies in crop production: A review / G. Papadopoulos et al. *Smart Agricultural Technology*. 2024. Vol. 8. Art. 100441. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100441>
6. Precision agriculture management based on a surrogate model assisted multiobjective algorithmic framework / D. Cheng et al. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. Art. 1142. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-27990-w>.
7. Lösch M., Schmidhalter U. Improving the congruency of satellite-based fertilizer maps with field-operable units using pneumatic spreaders. *Precision Agriculture*. 2023. Vol. 24. P. 1312–1332. DOI: 10.1007/s11119-023-09991-x.
8. A combined control method of traction and ballast for an electric tractor in ploughing based on load transfer / S. Zhang et al. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. Vol. 207. Art. 107750. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107750>
9. Improving path-tracking performance of an articulated tractor-trailer system using a non-linear kinematic model / M. Murillo et al.

Computers and Electronics in Agriculture. 2022. Vol. 196. Art. 106826. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106826>

10. Task assignment of multiple agricultural machinery cooperation based on improved ant colony algorithm / R. Cao et al. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 182. Art. 105993. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.105993>.

11. Тріщ Р. М., Грінченко Г. С. Сертифікація та підтвердження відповідності : навч. посіб. Харків : Друкарня Мадрид, 2021. 226 с.

12. Грінченко Г. С., Тріщ Р. М., Даниленко Ю. А. Науково-дослідні основи стандартизації : навч. посіб. Харків : Міськдрук, 2023. 254 с.

13. Управління якістю в системі технічного регулювання : навч. посіб. / Р. М. Тріщ, Г. С. Грінченко, В. М. Бурдейна, С. М. Артюх ; Укр. інж.-пед. акад. Харків : Укр. інж.-пед. акад., 2022. 219 с.

14. Models for Reducing the Duration and Cost of the Aviation Equipment Diagnostics Process Using the Decomposition of the Component Architecture of a Complex Product / O. Fedorovich et al. *Information Technology for Education, Science, and Technics. ITEST 2024. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2024. Vol. 221. P. 108–125. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4_9.

15. Adaptive Algorithms for Quantization Error Normalization of Digital Encoder-Based Tachometers / V. Kukharchuk et al. *Information Technology for Education, Science, and Technics. ITEST 2024. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2024. Vol. 221. P. 259–269. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4_19

16. Бабенко Д. В., Доценко Н. А., Горбенко О. А. Дослідження конструктивних і кінематичних характеристик енергоефективного олійного пресу. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science*. 2024. Вип. 28(3). С. 41-54. DOI: 10.56407/bs.agrarian/3.2024.41.

17. Бабенко Д. В., Доценко Н. А., Горбенко О. А., Бацуровська І. В. Дослідження характеру руху подрібненої маси по поверхні

решіт сепаратора насіння овочевих та баштанних культур. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science*. 2023. Вип. 27(4). С. 18-35. DOI: <https://doi.org/10.56407/bs.agrarian/4.2023.18>.

18.Babenko, D., Dotsenko, N., Gorbenko, O. Justification of the design parameters of improved equipment for tomato processing. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science*. 2025. Vol. 29, No. 3. P. 9–22. DOI: <https://doi.org/10.56407/bs.agrarian/3.2025.09>

19.Babenko, D., Dotsenko, N., Baczurowskaya, I. et al. Determination of the parameters of the use of water-lifting equipment in the conditions of livestock farms. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science*. 2022. Vol. 26, No. 3. P. 32–46. DOI: [https://doi.org/10.56407/2313-092X/2022-26\(3\)-3](https://doi.org/10.56407/2313-092X/2022-26(3)-3).

20.Зубко В. М. Агроінжиніринг : навчальний посібник для здобувачів вищої освіти спеціальностей 208 «Агроінженерія», 202 «Агрономія». Суми : СНАУ, 2022. 468 с.

Навчальне видання

**Управління якістю та оптимізація технологічних
параметрів обладнання в агроінженерії**

Методичні рекомендації

Укладач: **Доценко** Наталія Андріївна

Редактор: Н. А. Доценко

Комп'ютерний набір: Н. А. Доценко

Дизайн і верстка: Н. А. Доценко

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 10,25

Тираж 15 прим. Зам. №_

Надруковано у видавничому відділі
Миколаївського національного аграрного університету.
54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9