

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) автоматизації і комп'ютерних систем
Кафедра автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління
Освітній ступінь магістр
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
роботехніка»

(код і назва)

Освітньо-професійна програма Комп'ютерні технології та програмування в
автоматизованих системах управління

(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач

кафедри Ярослав СМІТЮХ

“ ” 20 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Лисенко Максима Михайловича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Синтез математичних моделей цифрових двійників з
використанням методів машинного навчання для автоматизації процесу
виготовлення карамельної маси

керівник роботи Сідлецьки Віктор Михайлович, доц., к.т.н,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “ ” 20 року №

2. Строк подання здобувачем роботи

3. Вихідні дані до роботи апаратурно-технологічна схема виробництва
карамельної маси, технічні характеристики об'єкта
автоматизації

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно
розробити) Вступ. Розділ 1 Аналіз стану проблеми і постановка завдання
дослідження Розділ 2. Загальносистемні рішення. Розділ 3. Розробка підсистеми
управління технологічним процесом. Розділ 4. Синтез математичних моделей
для цифрових двійників промислових об'єктів з використанням методів
машинного навчання. Висновки. Список використаних
джерел.

5. Перелік графічного матеріалу

Схема автоматизації – аркуш А3, Принципова схема контурів вимірювання,
регулювання та управління – аркуш А3, Схема з'єднань промислових мереж -
аркуш А4, Схема мережевих інформаційних потоків - аркуш А4

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

Лисенко М. М. _____
(прізвище та ініціали)

Сідлецький В. М. _____
(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	5
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ І ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	11
1.1. Загальний аналіз виробництва карамелі	12
1.2. Аналіз технологічного процесу виробництва карамельної маси.....	17
1.3. Короткий опис апаратурно-технологічної схеми	20
1.4. Аналіз існуючих систем автоматизації	21
1.5. Постановка задачі дослідження	25
РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНОСИСТЕМНІ РІШЕННЯ	26
2.1. Загальний опис об'єкту та системи	26
2.2. Розробка загальної ієрархічної моделі обладнання	29
2.3. Опис функцій, що автоматизуються	38
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ПІДСИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ	45
3.1. Схеми автоматизації	64
3.2. Схеми компонування промислового контролера.....	68
3.3. Схеми електричних принципів контурів вимірювання, управління та сигналізації	74
3.4. Схеми з'єднань та підключень проводок промислових мереж	78
РОЗДІЛ 4. СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ.....	85
4.1. Побудова моделей лінійної та нелінійної регресії	87
4.2. Побудова моделі множинної лінійної регресії	91
4.3. Побудова моделі множинної поліноміальної регресії.....	99
ВИСНОВКИ	116
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	118

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота розроблена на тему: «Синтез математичних моделей цифрових двійників з використанням методів машинного навчання для автоматизації процесу виготовлення карамельної маси».

Інтегрована автоматизована система керування процесу виготовлення карамельної маси розроблена з використанням промислового логічного контролера М-340 фірми Schneider Electric та Citect SCADA.

Перелік графічних матеріалів:

1. Схема автоматизації;
2. Принципова схема контурів вимірювання, регулювання та управління;
3. Схема з'єднань промислових мереж;
4. Схема мережевих інформаційних потоків.

Для комп'ютерної обчислювальної мережі управління виробництвом верхнього рівня використано Ethernet 100Base – TX, на нижньому рівні – локальна обчислювальна мережа рівня PLC – Modbus RTU.

Побудовано моделі множинної лінійної та поліноміальної регресії, регресійна ANN модель, які дозволять створити цифрові двійники, які можуть ефективно і в реальному часі імітувати процес виробництва карамельної маси, допомагаючи забезпечити стабільність та контроль за якістю продукції.

Ключові слова: карамельна маса, карамель, комплекс технічних засобів, комп'ютерна мережа, цифрові двійники, методи машинного навчання.

ANNOTATION

The qualification thesis is developed on the topic: "Synthesis of mathematical models of digital twins using machine learning methods for the automation of caramel mass production process."

An integrated automated control system for the caramel mass production process was developed using the M-340 industrial logic controller by Schneider Electric and Citect SCADA.

List of graphic materials:

1. Automation diagram;
2. Schematic diagram of measurement, control, and regulation circuits;
3. Diagram of industrial network connections;
4. Diagram of network information flows.

For the computer network of the upper-level production control, Ethernet 100Base – TX was used, while at the lower level, a local computing network of the PLC level – Modbus RTU was applied.

Models of multiple linear and polynomial regression, as well as a regression ANN model, were built, which will allow creating digital twins that can effectively and in real-time simulate the caramel mass production process, helping ensure stability and control over product quality.

Keywords: caramel mass, caramel, technical equipment complex, computer network, digital twins, machine learning methods.

ВСТУП

Кондитерська галузь займає важливе місце в економіці багатьох країн, зокрема в Україні, де виробництво солодоців є значною частиною харчової промисловості. Вона не лише забезпечує внутрішній ринок широким асортиментом продукції, але й є важливим сектором для експорту. В умовах глобалізації та посиленої конкуренції для досягнення високих результатів виробники кондитерських виробів змушені постійно вдосконалювати свої технологічні процеси, знижувати витрати та підвищувати якість продукції. Важливим аспектом є автоматизація та оптимізація процесів, які дозволяють досягати високих стандартів якості та зменшувати виробничі витрати.

В умовах швидкого розвитку промисловості та високих вимог до ефективності виробничих процесів важливим напрямом є впровадження інтелектуальних систем, здатних оптимізувати технологічні операції та знижувати витрати. Одним із таких рішень є використання цифрових двійників — віртуальних моделей фізичних об'єктів або процесів, які дозволяють моніторити, моделювати і оптимізувати виробничі процеси в реальному часі. Особливо перспективним є застосування цифрових двійників у харчовій промисловості, зокрема в процесах виготовлення карамельної маси, де висока точність і контроль технологічних параметрів є критично важливими для забезпечення якості продукції.

Для ефективного управління такими складними технологічними процесами важливо не лише створювати точні математичні моделі, але й інтегрувати ці моделі з сучасними методами обробки даних. Останніми роками активно розвиваються методи машинного навчання, які здатні автоматично знаходити оптимальні стратегії управління на основі даних, що надходять із реальних виробничих систем. Вони дають змогу не лише виявляти закономірності в процесах, а й прогнозувати зміни у поведінці системи, адаптуючи управлінські дії в реальному часі.

Ця магістерська робота присвячена розробці методології синтезу математичних моделей цифрових двійників для автоматизації процесу

виготовлення карамельної маси з використанням методів машинного навчання. Основною метою є створення віртуальної моделі технологічного процесу, яка дозволить ефективно управляти параметрами виробництва та забезпечити високу якість кінцевої продукції. В рамках роботи буде розглянуто методи збору та обробки даних, вибір алгоритмів машинного навчання для створення точних моделей, а також способи інтеграції цих моделей у систему автоматизації виробництва.

Розробка та впровадження цифрових двійників на основі машинного навчання є важливим кроком до підвищення ефективності виробництва та забезпечення сталості процесів у харчовій промисловості, що має значний економічний та технологічний потенціал для подальшого розвитку галузі.

Сучасні технологічні комплекси визначаються як складні, динамічні, організаційно-технічні (технологічні) системи, які здатні до самоорганізації, функціонуючи в певній просторово-часовій структурі. Такі система відчують значний вплив на мікро- та макrorівні внаслідок потужного потоку змін. За таких умов життєво важливим для організації управління є визначення та впорядкування специфічних закономірностей розвитку середовища. Керівники сучасних підприємств повсякчасно стикаються з необхідністю структуризації виробничих проблем, їх аналізу і прийняття чітких управлінських рішень в умовах невизначеності. Внаслідок швидкої зміни ситуації, управління технологічним комплексом кондитерської фабрики при дії великої кількості зовнішніх та внутрішніх факторів стикається з труднощами, що обумовлені необхідністю оперативного прийняття управляючих рішень в умовах невизначеності, дефіциту ресурсів та виникнення можливих нештатних ситуацій

Актуальність теми. Виготовлення карамельної маси є складним багатоступінчастим процесом, що вимагає точного контролю за температурою, витратою, часом та іншими критичними параметрами. Традиційні методи управління можуть бути недостатньо ефективними, що призводить до зниження якості продукції, підвищення витрат та збільшення

енергоспоживання. Впровадження цифрових двійників дозволяє в реальному часі оптимізувати процеси та знижувати витрати, що є важливим для покращення конкурентоспроможності підприємств.

Останніми роками методи машинного навчання значно розширили свої можливості, дозволяючи здійснювати точну адаптацію математичних моделей до складних і динамічних технологічних процесів. Завдяки цим методам можна створювати системи, які не лише реагують на поточний стан процесу, а й прогнозують майбутні зміни, забезпечуючи більш точний контроль та оптимізацію виробничих параметрів.

Цифрові двійники – це інструмент для модернізації виробничих процесів, дозволяє створювати точні віртуальні моделі, які відображають реальний стан об'єкта або процесу, що забезпечує можливість їх оптимізації без втручання в фізичні системи. Використання таких моделей для автоматизації виробництва карамельної маси дозволяє значно підвищити ефективність та надійність технологічних процесів.

Таким чином, дослідження синтезу математичних моделей цифрових двійників для автоматизації виготовлення карамельної маси є надзвичайно актуальним, оскільки дозволяє не лише оптимізувати виробничі процеси, але й сприяє підвищенню конкурентоспроможності підприємства, зниженню витрат, підвищенню якості продукції та забезпеченню сталості технологічних процесів в кондитерській галузі.

Мета та завдання дослідження. Метою даної роботи є створення інтегрованої автоматизованої системи керування процесу виробництва карамельної маси з використанням цифрових двійників методом машинного навчання.

Об'єктом дослідження є технологічний процес виробництва карамельної маси.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі основні задачі:

1. Провести системно-технічний аналіз технологічного комплексу кондитерської фабрики та цеху по виробництву карамельної маси;
2. Вдосконалити існуючу систему автоматизації, врахувавши проаналізовані особливості;
3. Розробити мережеві з'єднання між складовими комплексу;
4. Розробити математичні моделі цифрових двійників;
5. Дослідити та застосувати методи машинного навчання до отриманих моделей.

Наукова новизна. При виконанні роботи отримані такі нові наукові результати:

1. Представлено структурну схему комплексу технічних засобів КТЗ для процесу виробництва карамельної маси.
2. Побудовано моделі множинної лінійної та поліноміальної регресії.
3. Побудовано регресійну ANN модель.
4. Проведено порівняльний аналіз за результатами моделювання.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ І ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Розвиток кондитерської промисловості неможливий без постійного вдосконалення технологій виробництва. Від автоматизації процесів до впровадження нових методів зберігання та пакування — технологічні інновації дозволяють знижувати витрати, покращувати якість продукції, зменшувати її вартість і водночас зберігати конкурентоспроможність на ринку. Використання новітніх технологій для створення більш здорових продуктів, таких як цукерки без додавання цукру, допомагає задовольнити попит з боку споживачів, що слідкують за своїм здоров'ям.

Сучасна кондитерська промисловість постійно реагує на зміни у смаках та уподобаннях споживачів, а також на нові тренди у харчуванні. Так, зростає попит на здоровіші продукти, що сприяє розвитку органічних, безглютенових та низькокалорійних кондитерських виробів. З іншого боку, інновації у використанні екзотичних інгредієнтів (наприклад, суперфудів, спецій, нових видів фруктів) допомагають задовольняти потреби гурманів і створювати продукцію, що відповідає вимогам сучасного ринку.

Кондитерські вироби мають велике культурне значення у багатьох країнах. Вони є невід'ємною частиною святкових подій, традицій та сімейних урочистостей. Торт на день народження, шоколадні цукерки на свято, випічка на Новий рік — це лише кілька прикладів того, як кондитерська продукція тісно переплетена з культурними аспектами життя суспільства. Вона не лише задовольняє гастрономічні вподобання, але й виконує емоційну функцію, створюючи атмосферу свята та радості.

Кондитерська промисловість також стикається з проблемами охорони навколишнього середовища. Виробники кондитерських виробів все більше звертають увагу на сталий розвиток та екологічні норми. Це включає використання перероблених матеріалів для упаковки, зменшення викидів у виробничих процесах, а також впровадження ініціатив з органічного виробництва сировини. Залучення до програм соціальної відповідальності та

екологічних стандартів стає важливим чинником для успішного бізнесу в цій галузі.

Функціонування кондитерської фабрики — це комплексний процес, який вимагає чіткої організації всіх етапів виробництва, починаючи з постачання сировини і закінчуючи доставкою готової продукції кінцевому споживачу. Важливими аспектами є контроль якості, ефективна логістика, маркетинг і постійне вдосконалення виробничих процесів.

1.1. Загальний аналіз виробництва карамелі

Карамельні вироби – це кондитерські вироби, виготовлені з карамельної маси з начинкою або без неї. Карамельну масу одержують уварюванням висококонцентрованого розчину цукру (карамельного сиропу), з додаванням патоки або інвертного сиропу. Карамельні вироби є найбільш масовим видом цукристих кондитерських виробів – на їх частку приходить близько 35% від загального виробництва виробів цієї групи.

Сировина, з якої виготовляють карамель поділяється на основну і допоміжну: основна сировина – цукор, патока, інвертний сироп; допоміжна – мед, шоколад, горіхи, жири, молоко, алкогольні напої, харчові кислоти, ароматичні есенції, харчові барвники.

Карамельна маса складається, в основному, з вуглеводів. Начинки є більш різноманітними за складом і властивостями: крім цукрів вони містять ароматичні речовини, харчові кислоти, можуть містити також білки та жири (молочні продукти, горіхи, олійне насіння), вітаміни, мінеральні й пектинові речовини.



Більшість видів карамелі є, безумовно, бідними на вітаміни, оскільки вони практично відсутні у основній сировині й, до того ж, руйнуються під дією

високих температур у процесі виробництва. З метою підвищення біологічної цінності, до рецептури карамелі вводять різноманітні білкові збагачувачі, фруктові-ягідні та овочеві добавки, вітаміни.

Класифікація карамелі. Карамельні вироби класифікують за кількома ознаками.

За способом виготовлення карамель поділяють на види:

- без начинки (відкрита, загорнута, в таблетках, фігурна, монпансьє);
- з начинкою (з однією-двома різними начинками; з начинкою, прошарованою карамельною масою).

За способом обробки карамельної маси розрізняють карамель:

- з прозорою нетягнутою оболонкою (склоподібна прозора маса, яку одержують уварюванням цукрово-патокового сиропу);
- з непрозорою тягнутою оболонкою (капілярно-пориста блискуча маса, яку одержують кількаретовим перетягуванням нетягнутої маси);
- з прожилками й смужками.

Для приготування нетягнутої карамельної маси цукрово-патоковий сироп уварюють до 96% сухих речовин, швидко охолоджують до 85°C і до одержаної в'язко-пластичної маси додають барвники, кислоти, ароматизатори. Далі карамельній масі надають форму джгута, якій проминають між валками для рівномірного розподілення барвників, смакових речовин, видалення пухирців повітря та формують вироби.

Для одержання виробів з тягнутою оболонкою, в'язку карамельну масу на спеціальному обладнанні витягують у стрічку, складають, знову витягують, зберігаючи напрям витягування. Унаслідок цього до маси потрапляє повітря, яке утворює в ній повітряні прошарки й тоненькі капіляри, заповнені повітрям. В результаті карамельна маса втрачає прозорість, стає шовковистою, набуває ніжної волокнистої структури.



За рецептурою карамельної маси:

- льодяникова;
- з начинками;
- молочна (в основному з начинками);
- вітамінізована (переважно льодяникова);
- м'яка (напівтверда), консистенція якої обумовлена рецептурним складом: помадна маса, патока, кокосова олія, стабілізатори структури;
- лікувальна.

Асортиментний ряд вітамінізованої льодяникової карамелі представлений таблетованими виробами або виробами у вигляді кубиків чи інших дрібних форм. З метою надання виробам лікувальних властивостей до карамельних мас додають мед, вітамінні добавки, екстракти лікувальних рослин (шавлії, м'яти, звіробою, шипшини).

За видом начинки (для карамелі з начинкою):

- фруктово-ягідна (перетерті плоди та ягоди, уварені з цукром);
- шоколадно-горіхова (розтерті обсмажені горіхи, цукор, какао-продукти);
- лікерна (суміш цукрово-патокового сиропу та алкогольного напою);
- кремово-збивна (маса, збита з яєчним білком або піноутворювачем з додаванням вершкового масла й фруктового наповнювача);
- медова (суміш цукрово-патокового сиропу та натурального меду або медової есенції);
- помадна (збитий уварений цукрово-патоковий сироп);

- масляно-фруктова або прохолоджувальна (кокосове масло, змішане з цукровою пудрою);
- молочна (суміш цукрово-патокового сиропу та молочних продуктів);
- горіхова (розтерті обсмажені горіхи з додаванням цукру);
- марципанова (розтерті необсмажені горіхи чи олійне насіння з додаванням цукрового сиропу);
- збивна (маса, збита з яєчним білком або піноутворювачем);
- желейна (суміш цукрово-патокового агарового сиропу та фруктовоягідного пюре).

Виготовляють також карамель з начинками із злакових, бобових, олійних культур тощо. Кількість начинки залежно від розміру карамелі складає 23-33% загальної маси виробів.

За наявності або відсутності обгортки:

- загорнута;
- відкрита.

Залежно від способу обробки поверхні. Карамельна маса містить до 23% редуруючих цукрів, що володіють високою гігроскопічністю. Для того щоб карамель не зволожувалася при зберіганні, її поверхню обробляють (в більшості це стосується відкритої карамелі).

Карамель залежно від способу обробки поверхні може бути:

- глянсована (на поверхню наносять тонкий шар жирно-воскової суміші);
- глазурована (покрита тонким шаром шоколадної глазури);
- дражерована (поверхню карамелі обливають гарячим цукровим сиропом, обсипають цукровою пудрою або сумішшю цукрового піску і какао-порошку, й потім глянсують);
- кондована (поверхню покривають тонкою дрібнокристалічною цукровою кірочкою);
- обсипна (поверхню покривають цукровим піском або цукровою пудрою в суміші з какао-порошком).

Якість карамельних виробів оцінюється органолептичними і фізико-хімічними показниками.



Органолептичні показники:

Зовнішній вигляд та стан обгортки – обгортка й підгортка карамелі загорнутої повинні бути без розривів, мають щільно облягати виріб і не прилипати до його поверхні.

Форма карамельних виробів повинна бути відповідною конкретному виду виробів, без деформації і перекосу шва. Монпансьє і фігурна карамель повинні бути чітко відформовані.

Поверхня карамелі має бути суха, без тріщин, краплень, гладка або з чітким малюнком. Неприпустимі відкриті шви, вихід начинки на поверхню. Карамель, глазурована шоколадною глазур'ю, не повинна мати сіруватого кольору від жирового або цукрового «посивіння».

Колір – карамелі повинен бути властивим даному найменуванню, рівномірним, достатньо вираженим, яблучні начинки мають бути світлими.

Смак і аромат – мають бути відповідними назві, без сторонніх відтінків. У лікувальної карамелі припустимий присмак відповідного препарату. Карамель, що містить жир, не повинна мати осаленого, прогірклого присмаків. Для фруктових начинок неприпустимий підгорілий присмак.

З фізико-хімічних показників визначають:

- масову частку вологи карамельної маси (не більше 3-4%);

- масову частку редукуючих речовин (20-22%);

- кислотність (від 3° до 26° для різних найменувань карамелі); зольність; кількість штук в 1кг; кількість начинки (залежно від розміру карамелі – 17-

33%); кількість глазурі (у глазурованій карамелі); масову частку цукру або іншого оздоблювального матеріалу, що відокремився від оболонки. Нормується кількість важких металів, афлатоксинів, мікотоксинів, радіонуклідів.

Дефекти карамелі: наявність сторонніх присмаків і запахів – карамелізованого або підгорілого для фруктових начинок, прогірклого, осаленого для жировмісних начинок, різкого смаку есенції; липка поверхня або налипання обгортки свідчать про підвищений вміст редуруючих цукрів, підвищену вологість карамельної маси або про те, що вироби зберігали за підвищеної вологості, при перепадах температур; тріщини на поверхні, відбиті кути, сколи.

Зберігання карамельних виробів повинно відбуватись в добре вентильованих приміщеннях, сухих, опалювальних, не заражених шкідниками за температури $18 \pm 3^{\circ}\text{C}$ і відносної вологості повітря не більше 75%. Карамель не повинна піддаватись дії сонячного світла, і порушуванням правил товарного сусідства.

1.2. Аналіз технологічного процесу виробництва карамельної маси

Виробництво карамельної маси є складним багатоступінчастим процесом, що включає ретельний контроль за температурою, вмістом інгредієнтів, консистенцією та якістю готової продукції. Кожен етап технологічного процесу має велике значення для забезпечення стабільної якості та смаку карамелі, що відповідає вимогам споживачів.

Процес приготування карамельної маси складається з таких основних компонентів:

- **Сировина:** цукор, глюкоза, вода, молоко, вершки, масла, ароматизатори, кислоти (для регулювання рН), барвники.
- **Технологічне обладнання:** розчинники, варильні апарати, змішувачі, системи контролю температури та вологості, охолоджувальні системи.
- **Персонал:** оператори, технологи, контролери якості.

- **Процес контролю якості:** перевірка температури, текстури, кольору, смаку.

Виробництво карамельної маси включає варку сиропу, його карамелізацію, охолодження, формування та пакування. Це складний технологічний процес, де важливі точність температури, використання правильної сировини і контроль за кінцевими характеристиками продукту, що визначають якість і смак готової карамелі.

Виділяють такі основні етапи:

1. Підготовка сировини:

- підбір інгредієнтів відповідно до рецептури;
- просіювання цукру, підготовка масла та інших компонентів.

2. Змішування інгредієнтів:

- цукор і глюкоза змішуються з водою в певних пропорціях. Іноді додають молоко або вершки, щоб зробити масу більш м'якою;
- суміш нагрівають, щоб розчинити цукор і досягти необхідної консистенції сиропу.

3. Варіння маси:

- маса нагрівається до температури близько 150–160°C, що дозволяє отримати карамельну структуру (перетворення цукру в карамель);
- температура контролюється для досягнення потрібної текстури;
- регулювання часу варіння та температури важливе для забезпечення правильної консистенції (від м'якої до твердої).

4. Охолодження:

Після досягнення бажаної температури карамельна маса охолоджується до кімнатної температури або до температури, при якій її можна використовувати для формування карамелі.

5. Формування та пакування:

- карамельну масу можна використовувати для формування карамелі або інших виробів. Цей етап включає додавання ароматизаторів або барвників, якщо це необхідно.

- пакування та зберігання готової карамелі в умовах, які не дозволяють їй втратити свої властивості.

Вхідні параметри процесу:

- Якість і кількість сировини.
- Температурні режими та час варіння.
- Технічні характеристики обладнання.
- Навколишні умови (вологість, температура в приміщенні).

Вихідні параметри процесу:

- Якість карамельної маси (консистенція, смак, текстура).
- Кількість виробленої карамелі.
- Ефективність використання сировини.

Критерії якості карамельної маси

Карамельна маса повинна відповідати кільком критеріям якості:

- **Консистенція:** повинна бути еластичною, м'якою, не кришитись при стисненні.
- **Колір:** від золотисто-жовтого до темно-коричневого, залежно від технології.
- **Смак:** солодкий, з карамельним присмаком, без сторонніх домішок.
- **Температура:** контроль температури на всіх етапах варіння та охолодження для досягнення бажаного результату.

Оптимальна температура та час варіння дозволяють отримати карамельної маси бажаної консистенції. Недостатнє або надмірне нагрівання може призвести до дефектів у текстурі та смаку. Вміст вологи в масі є критичним для досягнення правильної текстури. Занадто велика кількість вологи може призвести до м'якості або липкості карамелі. Використання добавок, як-от масла або кислоти, можуть змінювати структуру маси і її смакові якості.

Системний аналіз процесу приготування карамельної маси дозволяє зрозуміти важливість кожного етапу виробництва і взаємозв'язок між різними компонентами системи (сировина, обладнання, технологічний процес, контроль якості). Оптимізація процесу, контроль температури та часу варіння, а також

правильний вибір інгредієнтів дозволяють досягти стабільної якості кінцевого продукту.

1.3. Короткий опис апаратурно-технологічної схеми

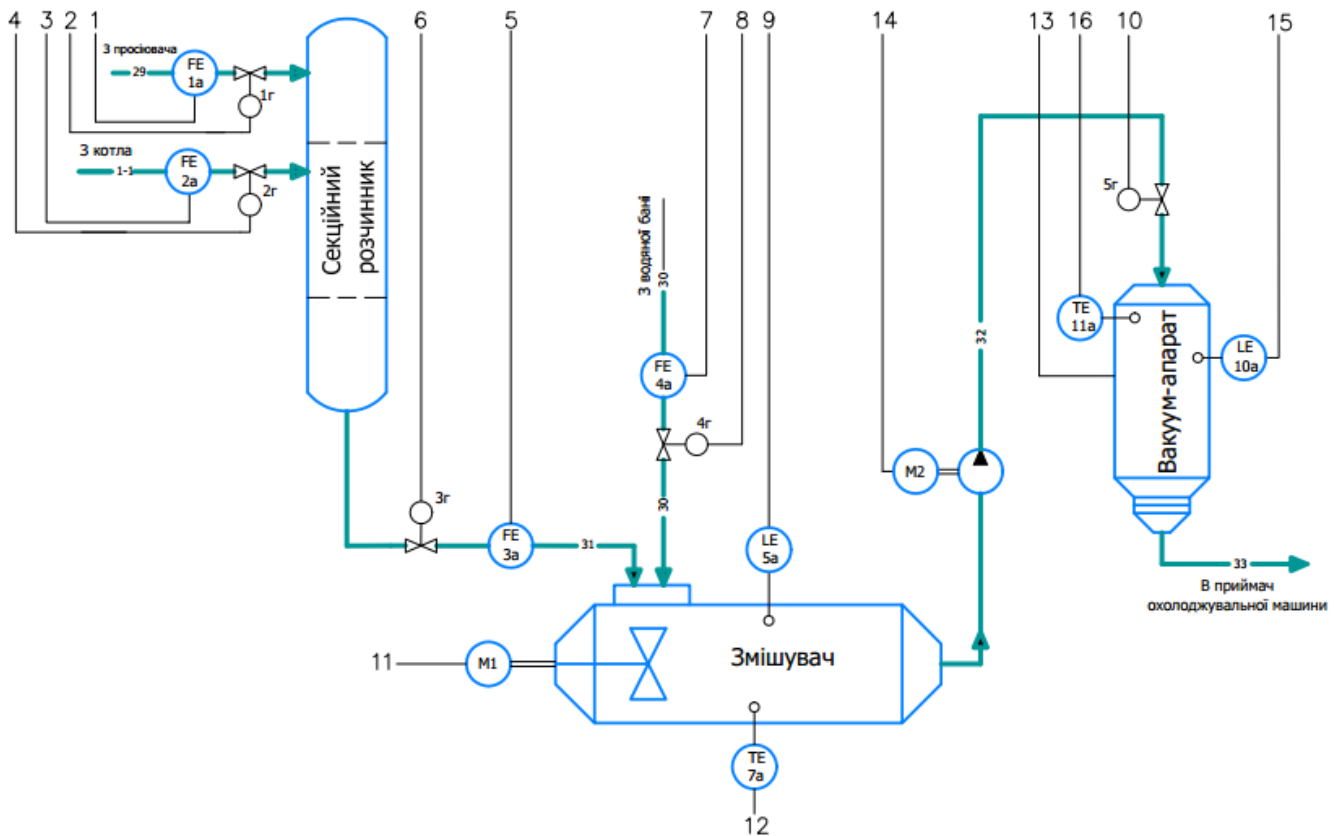
В секційний розчинник у 1 секцію надходить очищений від феродомішок цукор-пісок, після наповнення 1 секції вона відкриває закритий до цього часу шлях для цукру та він потрапляє в 2 секцію, в яку у свою чергу надходить підігріта вода. Цукор розчиняється у воді та являє собою певну масу розчиненого цукру у воді та надходить до змішувача. Також до змішувача надходить гаряча патока, та вони змішуються до однорідної маси, після утворення не увареної карамельної маси суміш подається змієвиковим насосом до вакуум-апарату, де уварюється та стає карамельною масою. Після уварювання з вакуум-апарата маса вивантажується та йде далі по технологічному процесу.

Приготування карамельної маси відбувається по такій рецептурі:

Цукор-пісок – 560 кг

Гаряча вода – 56 кг

Гаряча патока – 280 кг



Малюнок 1.1 - Апаратурно-технологічна схеми процесу виготовлення карамельної маси

1.4. Аналіз існуючих систем автоматизації

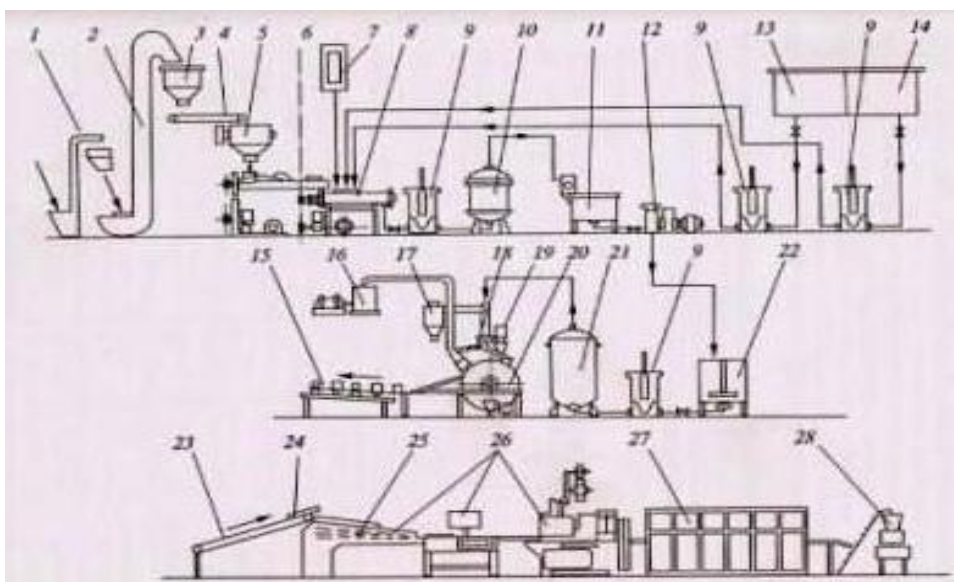
Промислове виробництво карамельної маси та карамелі в цілому бере початок в першій половині XVI століття. За ці роки виробництво карамельної маси пройшло багато етапів розвитку та відповідних змін.

Наприкінці XIX століття процес виробництва карамелі став значно ефективнішим завдяки розвитку промислових технологій і машин. Поява перших фабрик з виробництва цукерок та карамелі стала можливим через вдосконалення методів обробки цукру, а також завдяки появі перших механізмів, які дозволяли автоматизувати виробництво. Також у цей час карамель почала виготовлятися не лише з цукру, а й з додаванням масла, молока та ванілі, що створило нові смаки і текстури продукту.



Малюнок 1.2 – Модернізація виробництва

З появою парових котлів, спеціалізованих пресів для формування карамелі та обладнання для упаковки отримали масове виробництво карамелі.



Малюнок 1.3 – Машинно-апаратурна схема виробництва льодяникової карамелі

Сьогодні виробництво карамелі є високотехнологічним процесом, де використовуються різні інгредієнти та спеціальні технології для досягнення бажаних смакових і текстурних характеристик. Сучасні технології дозволяють автоматизувати весь процес від змішування інгредієнтів до упаковки готових виробів.



Малюнок 1.4 – Фрагменти автоматизованих ліній виробництва карамелі

В умовах сучасного розвитку кондитерської справи, враховуючи великі завантаження технологічних ліній задіяних в переробці сільськогосподарської сировини, наявність процесів поточно-масового характеру, висока якість готової продукції можливо тільки при повній автоматизації виробництва і максимального виключення впливу на процес людського фактора. В даний час існує безліч засобів і систем автоматизації, вибір яких здійснюється в залежності від поставленого завдання.



Малюнок 1.5 – Мнемосхема лінії виробництва карамелі на ПрАТ «Вінницька кондитерська фабрика»

Компанія «Техінсервіс» також виступила розробником автоматизованої системи управління. Команда Techinservice Intelligence спроектувала «під ключ» автоматизовану систему управління технологічним процесом для всього

комплексу фабрики індивідуально під потреби Замовника із застосуванням новітніх технологічних рішень на базі Citect SCADA.



Малюнок 1.6 – Щити АСУТП

Тенденції розвитку

Інтеграція з ІТ-системами. Застосування системи "Інтернету речей" (IoT) для моніторингу та управління технологічними процесами в реальному часі стає все більш популярним.

Інтелектуальні системи управління. Використання алгоритмів штучного інтелекту для прогнозування та оптимізації процесів виробництва, що дозволяє не тільки автоматизувати, але й покращити продуктивність та якість.

Модульність та гнучкість. Сучасні автоматизовані системи стають більш гнучкими і можуть бути адаптовані до різних вимог виробництва, що дозволяє підприємствам швидко реагувати на зміну ринку чи вимог споживачів.

1.5. Постановка задачі дослідження

Автоматизація виробництва завжди була однією з основних складових прискорення техніко-економічного прогресу в промисловому комплексі. Мікропроцесорні пристрої та ПК, пов'язані між собою обчислювальними й керуючими мережами з використанням загальних баз даних, дозволяють впроваджувати комп'ютерні технології у нетрадиційні сфери діяльності підприємства, що проявляється в інтеграції виробничих процесів і управлінні.

Метою процесу є отримання карамельної маси, яка використовуватиметься для виготовлення різних видів карамелі або як основа для інших кондитерських виробів.

Завданнями є:

- виготовлення карамельної маси з необхідними фізико-хімічними властивостями (колір, смак, консистенція);
- збереження стабільності та якості продукту на всіх етапах виробництва;
- підвищення ефективності та зниження витрат сировини.

Метою магістерської роботи є розробка інтегрованої автоматизованої системи керування процесу виробництва карамельної маси з використанням цифрових двійників методом машинного навчання.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі основні задачі:

- провести системно-технічний аналіз технологічного комплексу кондитерської фабрики та цеху по виробництву карамельної маси;
- вдосконалити існуючу систему автоматизації, врахувавши проаналізовані особливості;
- розробити мережеві з'єднання між складовими комплексу;
- розробити математичні моделі цифрових двійників;
- дослідити та застосувати методи машинного навчання до отриманих моделей.

РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНОСИСТЕМНІ РІШЕННЯ

2.1. Загальний опис об'єкту та системи

Кондитерська промисловість охоплює виробництво різноманітних солодких виробів і є важливою галуззю харчової промисловості, оскільки вона займається виробництвом продукції, що має великий попит серед населення завдяки своїм смаковим якостям і здатності приносити задоволення від споживання.

Це одна з найбільш розвинених та динамічних галузей харчової промисловості, яка постійно адаптується до змін ринку, споживчих уподобань і технологічних нововведень. Важливим аспектом є те, що продукція може мати не лише традиційні смакові якості, але й відповідати сучасним тенденціям здорового харчування, включаючи безглютенові, веганські, безцукрові та органічні варіанти.

Поряд з цим розвиток кондитерської справи впливає на покращення економічної ситуації в країні, адже створює тисячі робочих місць, стимулює розвиток сільського господарства (зокрема виробництво цукру, какао, молочних продуктів, горіхів та фруктів), а також є важливим компонентом зовнішньої торгівлі. Кондитерська продукція експортується до багатьох країн, а її попит є стабільним навіть в умовах економічних криз, що робить цю галузь важливим чинником економічної стабільності.

Сучасні умови, вихід на нові європейські площадки, широка конкуренція, спонукає кондитерські фабрики відповідати міжнародним стандартам, переходити на інноваційні методи управління та організації виробництва, з застосуванням цифрових двійників, штучного інтелекту та ін.

Даний перехід можливий лише при використанні інтегрованих автоматизованих систем керування (ІАСК) у синтезі з цифровими двійниками при використанні методів машинного навчання.

Так як в роботі розглядаємо виробничу площадку всієї відомої кондитерської корпорації «Рошен» нам лишається вдосконалити вже існуючу сучасну систему керування і для цього треба детальний аналіз всіх етапів виробництва, визначення матеріальних та інформаційних потоків, дослідження існуючого рівня автоматизації підприємства.

Кондитерська галузь досить об'ємна та різногранна, вміщає в себе багато видів продукції, це і вироби з шоколаду, і торти, і тістечка з печивом, і всілякі цукерки. Тож зупинимось більш детально на інгредієнті, який є основою більшості цукеркових виробів - карамельній масі.

Процес приготування карамельної маси включає в себе наступні процеси:

- *фізико-хімічного перетворення* (топлення цукру (кармелізація), варіння карамельної маси). Ці процеси включають зміну властивостей сировини через вплив температури, часу або механічних впливів, що є основою виробництва карамельної маси.

- *механічного змішування та обробки* (змішування інгредієнтів, збивання та аерація). Ці процеси використовуються для забезпечення однорідної текстури та правильної консистенції карамельної маси.

- *термічної обробки* (варіння та охолодження). Термічні процеси включають використання тепла для змінення фізичних і хімічних властивостей сировини.

- *формування та обробки*. Після приготування карамельної маси необхідно надати їй форму та отримати готову продукцію.

Всі ці процеси є частинами загального технологічного ланцюга виробництва карамельної маси, і кожен з них має свою роль у забезпеченні якості і консистенції готової продукції. Технологія виготовлення карамелі потребує чіткого контролю на кожному етапі, починаючи від підготовки сировини до остаточної упаковки готових виробів.

Технологічне обладнання кондитерських фабрик за призначенням діляться на групи:

- *транспортери*: для переміщення сировини або готової продукції між різними ділянками виробництва.
- *роботизовані системи*: для автоматизації упаковки, сортування та інших повторюваних процесів.
- *пневматичні системи*: для транспортування порошкоподібних матеріалів (наприклад, цукрової пудри або какао).

- млини та дробарки: для подрібнення і обробки сировини, наприклад, борошна, какао, цукру.
- міксери та змішувачі: використовуються для змішування інгредієнтів у потрібних пропорціях, що забезпечує однорідність сумішей.
- охолоджувальні машини чи тунелі: для швидкого охолодження виробів.

В магістерській роботі об'єктом дослідження є ПрАТ «Вінницька кондитерська фабрика». Відповідно до наведеної вище класифікації підприємство можна віднести до технологічного (ТК) неперервного типу, який характеризується значними матеріальними та енергетичними потоками під час тривалого часу функціонування, в якому відбуваються фізико-хімічні перетворення з метою отримання готової продукції.

За даними системного аналізу ПрАТ «Вінницьку кондитерську фабрику» можна сміливо зарахувати до технологічного комплексу **ТК неперервного типу виробництва**, оскільки більшість виробничих процесів потребують безперервної роботи для забезпечення високих темпів виготовлення великої кількості продукції. Для цих комплексів характерно:

- наявність та можливість виділення окремих підсистем (дільниць);
- можливість управління підсистемами за різними критеріями;
- можливість оптимізації роботи підсистем;
- необхідність координації роботи підсистем;
- необхідність урахування зовнішніх та внутрішніх збурень, що призводить до структурного управління;
- формування ієрархічної структури управління.

ПрАТ «Вінницька кондитерська фабрика» за продуктивністю відноситься до комплексів з високою продуктивністю; за способом функціонування - неперервного типу; за кількістю виконуючих функцій - багатофункціональний; за кількістю ланок - багатоланковий; за ступенем однорідності - неоднорідний; за способом з'єднання – послідовний; за характером потоку – змішаний; за

інформаційною потужністю - середньої потужності; за рівнем автоматизації – високий.

Складовою ТК кондитерської фабрики є процес виробництва карамельної маси, який є невід'ємною частиною безперервно-поточної лінії (БПЛ), на якій досягнута повна синхронізація основних і допоміжних технологічних операцій, всі операції виконуються на спеціалізованих робочих місцях, які розташовані по ходу технологічного процесу одне за одним, реалізована в окремому приміщенні.



Малюнок 2.1 – Обладнання процесу виробництва карамельної маси

2.2. Розробка загальної ієрархічної моделі обладнання

Швидкий розвиток корпоративних систем призвів до розуміння, що для ефективного управління складними виробництвами потрібен єдиний

стандарт. На сьогоднішній день широко описані стандарти ISA_88, ISA_95 та їх європейські аналоги IEC 61512, IEC 62264.

ISA_88 –стандарт управління періодичним (процедурним) виробництвом, розроблявся на базі існуючого на той момент стандарту NAMUR N33 і був покликаний допомогти у вирішенні кількох фундаментальних проблем, таких як відсутність єдиної моделі рецептурного виробництва, складність узгодження вимог, труднощі інтеграції рішень різних постачальників, складне управління рецептурним виробництвом. Для вирішення цих проблем необхідно було визначити єдині моделі, термінологію, структуру даних і мову опису процесу.

Структура стандарту відповідає поставленим завданням і включає чотири частини:

- ISA_88.01 1995 року, Batch Control Part 1: Models and Terminology - визначає стандартні моделі і термінологію для формалізації вимог до систем управління періодичним виробництвом, його еквівалент - IEC61512-1;
- ANSI/ISA 88.00.02 2001, Batch Control Part 2: Data Structures and Guidelines for Languages - визначає моделі даних для управління виробництвом, структури даних для обміну інформацією, а також форму записи рецептури;
- ANSI/ISA 88.00.03 2003 Batch Control Part 3: General and Site Recipe Models and Representation - визначає моделі для подання узагальнених рецептур і обміну такими рецептурами між підрозділами підприємства, а також між підприємством і його партнерами;
- ANSI/ISA 88.00.04 2006, Batch Control Part 4:Batch Production Records - визначає моделі даних і орієнтовну модель системи для запису, зберігання, вилучення та аналізу даних про хід періодичного виробництва.

ISA_95 – стандарт для розробки інтерфейсу між підприємствами і керуючими системами, був розроблений для застосування в усіх видах виробництва, для всіх видів процесів.

На виробничих площадках кондитерської корпорації «Рошен» використовується найрізноманітніше обладнання, системи керування побудовані на основі різних обчислювальних засобів. Враховуючи специфіку технологічного комплексу кондитерської фабрики, яка полягає в поєднанні двох принципово різних типів процесів: періодичних та неперервних безумовно треба забезпечити їх спільне функціонування. Необхідно, щоб всі ці системи відповідали єдиним стандартам, використовували уніфікований спосіб запису рецептур, відображення поточного стану обладнання.

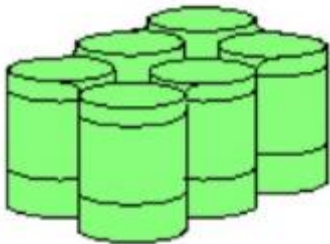


Неперервні процеси (Continuous processes)

передбачають неперервний потік матеріалу через різне технологічне обладнання. Як тільки неперервний процес переходить в усталений режим, його ціллю є виробництво продукту заданої якості незалежно від тривалості виконання операції.

Характерними ознаками неперервного виробництва є:

- велика тривалість виробництва;
- однакова технологія виробництва;
- основні діяльності керування – регулювання, інколи послідовні операції;
- задані технологічні параметри змінюються лише при зміні сировини чи зовнішнього середовища;
- основні зміни припуску, зупинці, нештатних ситуаціях;
- сировина в процесі практично не ідентифікується.



Періодичні процеси (Batch processes) порційне, малосерійне, рецептурне. Великий асортимент продукції у заздалегідь визначених кількостях партіях за обмежений період часу.

Характерними ознаками періодичного виробництва є:

- кожна партія за окремим регламентом (рецептом);

- на різних стадіях приготування партії процес потребує багато різних діяльностей як синхронізація, підрахунок, послідовностей блокування, обробки матеріалу, регулювання;
- матеріальний потік може змінюватися від партії до партії або/і в межах партії;
- вхідна сировина не зберігає свою індивідуальність;
- одне і те ж обладнання для різних типів продукції.

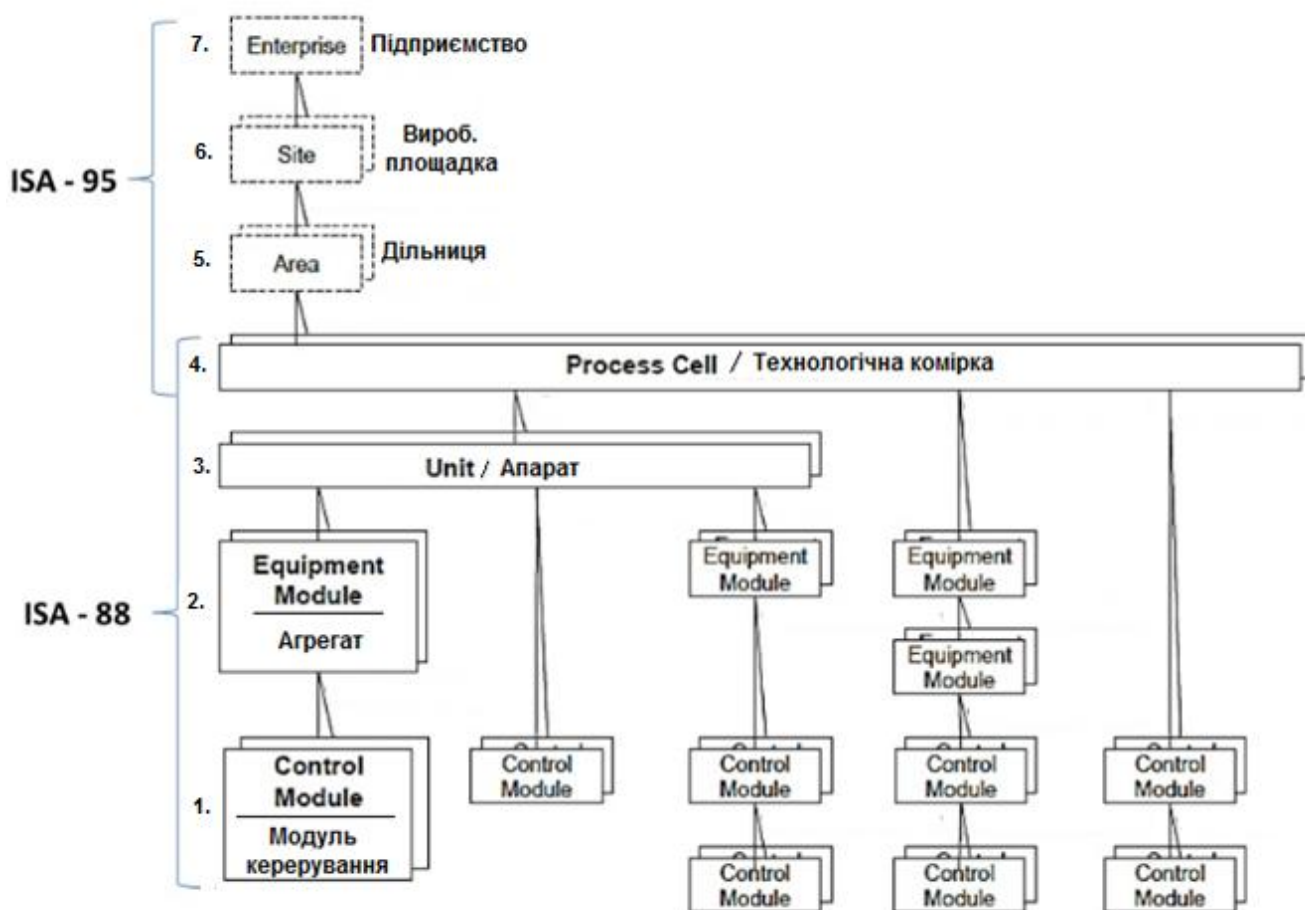
Стандарт ISA-88.01 визначає фізичну і процедурну моделі виробництва. Фізична модель в цілому визначає виробничу осередок обладнання, необхідного для виробництва партії продукції. Основним поняттям тут є модуль - основна одиниця устаткування, що виконує головний крок процесу.

Фізична модель (модель обладнання) в загальному випадку включає 7 рівнів:

1. Блок керування (Control Module);
2. Агрегат (Equipment Module);
3. Установка (Unit);
4. Осередок процесу (Process Cell);
5. Виробнича ділянка (Area);
6. Виробництво (Site);
7. Підприємство (Enterprise).

Осередок процесу (Process cell) - єдиний обов'язковий рівень моделі. Вона включає всі установки, агрегати і блоки управління, необхідні для виробництва однієї або декількох партій. Осередок процесу може включати лінії (train), що складаються з обладнання, необхідного для виготовлення певної партії. При виготовленні партії необов'язково використовується все обладнання, що входить в лінію, в той же час одна лінія може бути задіяна одночасно у виготовленні кількох партій і /або продуктів. Осередок процесу може включати більше однієї лінії, при цьому лінія не може включати обладнання, що не входить в осередок процесу. Осередки процесу є основою для планування і управління виробництвом продукції. Процедурна модель (модель ТП) в загальному випадку включає чотири рівні: фаза (Phase); виробнича операція (Operation); процес (Unit Procedure);

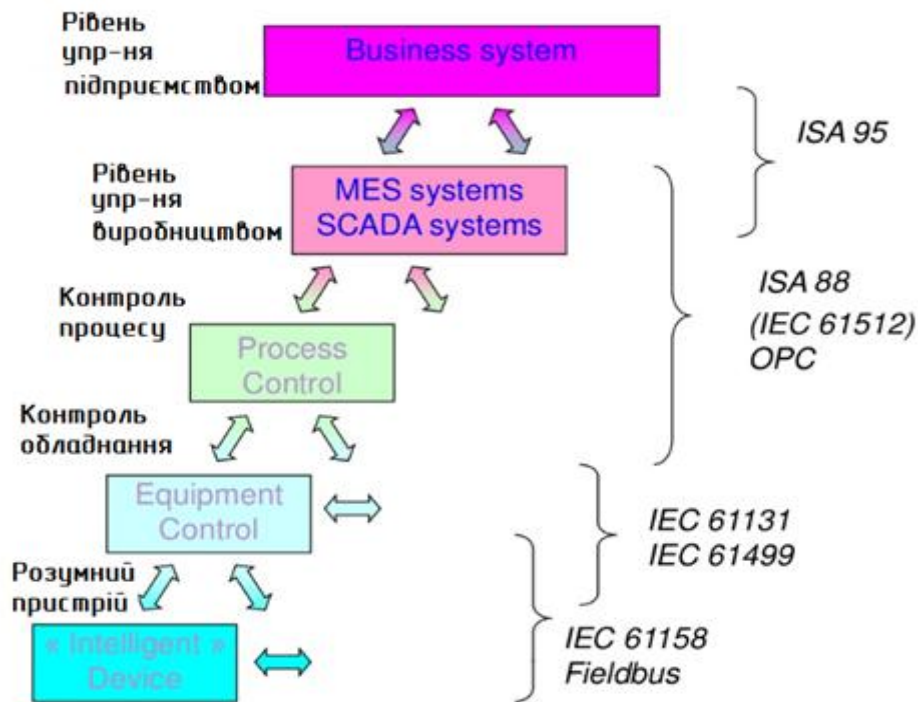
технологія (Procedure). Технологія (Procedure) на стратегічному рівні визначає послідовність заходів, які необхідно виконати для виробництва партії. Вона складається з необхідного числа процесів (Unit Procedure). А процес, в свою чергу, складається з ланцюжка послідовності виробничих операцій, що виконуються на одній установці, і моделює один з основних кроків (стадій) створення партії. Передбачається, що в кожен момент часу на установці виконується тільки одна операція, при цьому кожна операція повністю завершується в межах установки. Проте безліч процесів однієї технології може виконуватися на кількох установках одночасно, а кожен процес на своїй установці.



Малюнок 2.2 – Загальна фізична модель обладнання

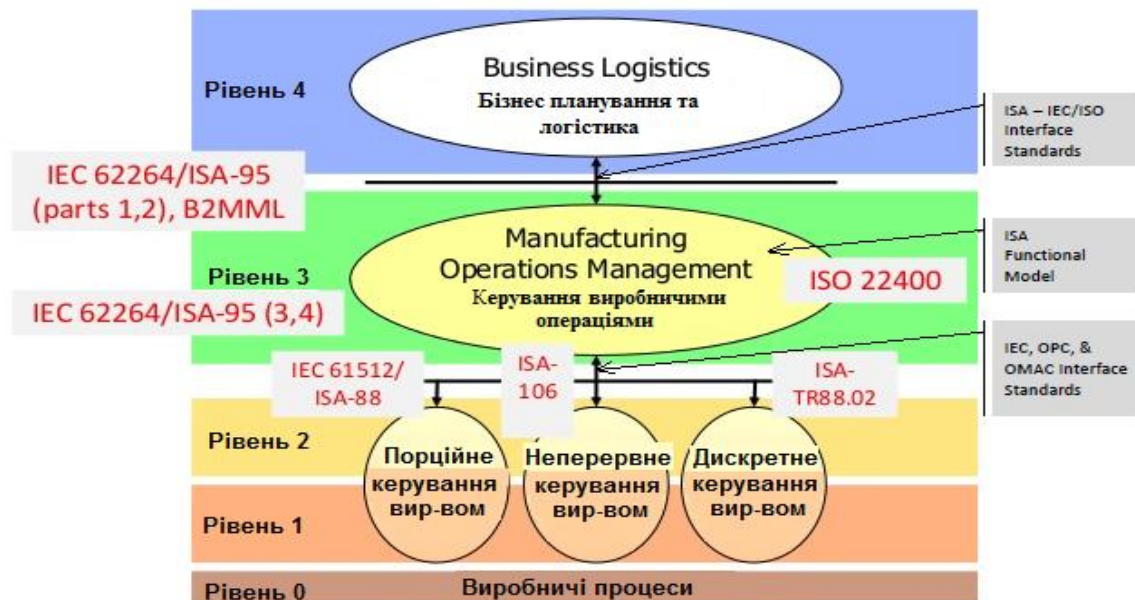
На інноваційній виробничій площадці автоматизовані системи керування технологічними процесами повинні взаємодіяти не тільки з аналогічними системами, але і з системами керування верхнього рівня, в тому числі MES/MOM і ERP. Якщо обмін даними з MES/MOM ще може бути описаний в рамках ISA_88,

то передача даних від MES до ERP вимагає вже інших стандартів. Один з найбільш відомих стандартів обміну інформацією між MES/MOM і корпоративними інформаційними системами це стандарт ISA_95.



Малюнок 2.3 – Ієрархія стандартів по вертикалі виробництва

На перший погляд (малюнок 2.3) стандарти ISA_95 і ISA_88 прекрасно доповнюють один одного, так що складається враження, що разом вони охоплюють всі виробничі системи - від ERP до локальних систем управління. Але в той же час між двома стандартами існують серйозні відмінності, що стосуються моделей обладнання, функціональних та інформаційних моделей. Без урахування таких відмінностей важко розраховувати на позитивний результат при спільному використанні стандартів.



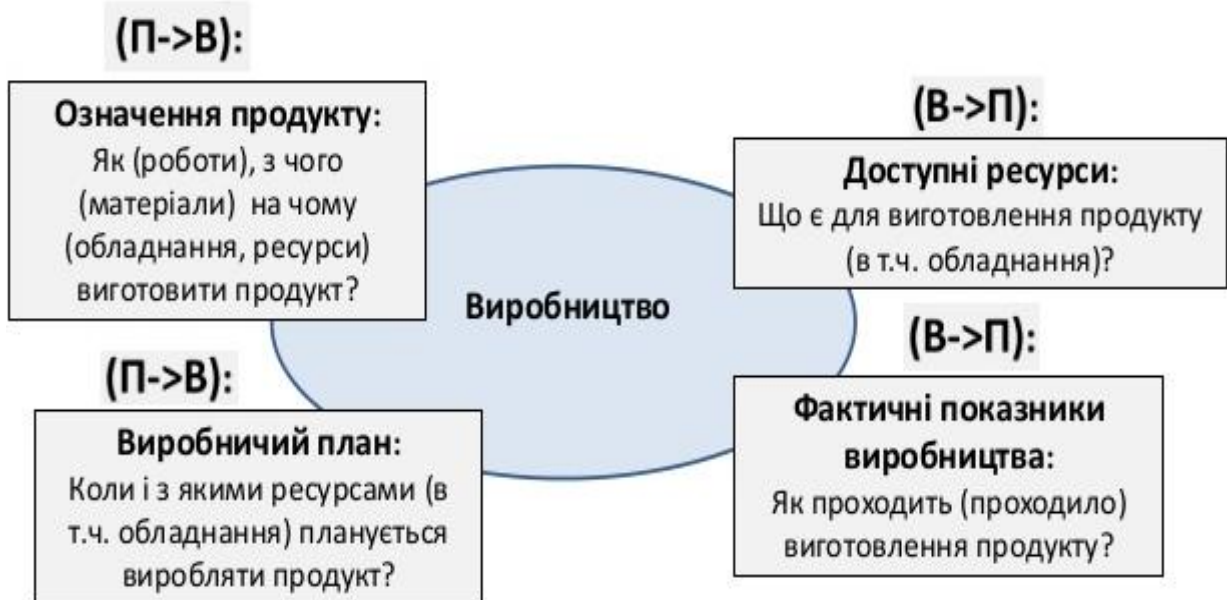
Малюнок 2.4 – Інтегроване виробництво згідно стандартів

Проблеми інтеграції нижніх рівнів з засобами рівня MES/MOM та іншими підсистемами перш за все лежать у функціональному представленні об'єктів нижнього рівня для верхнього та взаємної координації засобів одного рівня. У більшості існуючих рішень на верхній рівень (SCADA/HMI) передається "сирі" дані, які попередньо необхідно оброблювати. У зв'язку з недостатньою кількістю інформації (наприклад про дані що не відображаються) та порівняно невеликою швидкістю обміну між контролерами та SCADA/HMI, деякі важливі KPI (Key performance indicators, ключові показники ефективності) та статистичні чи агреговані дані на 2-му рівні, які потребуються 3-му (MES/MOM) важко обрахувати, або їх значення не може бути забезпечено з заданою точністю.

Додатковою проблемою також є відсутність інформації про достовірність даних. Так, наприклад, ігнорується відмова каналу ПЛК при відображенні на SCADA/HMI та передачі недостовірних даних на верхні рівні MES/MOM. У той же час, обчислювальні ресурси засобів керування, зокрема промислових контролерів, значно виросли. Тому попередню обробку даних варто робити безпосередньо в засобах автоматизації рівня керування процесом чи машиною (та навіть польового рівня). У Чернетка 25.03.18 в запропонованій концепції пропонується використовувати ідеї та модель ієрархії обладнання зі стандартів ISA_88/95/106 та RAMI4.0 (модель Industry 4.0), відповідно до яких, інформація по кожному обладнанню представляється своїм набором структур в пристрої, що

керує/контролює цим обладнанням. Це дає можливість робити розрахунки саме за місцем проведення вимірювань та керування конкретним обладнанням, а також робить систему більш гнучкою стосовно варіантів функціонального розподілення.

Використовується принцип функціонального розподілення (IEC TR 62390), який передбачає розділення всього застосунку (Application) на функціональні блоки і може бути використаний в різних парадигмах керування (централізована або децентралізована IEC 61131 та розподілена IEC 61499). Прикладом такого підходу є використання структур та функцій, що відповідають за керування двигуном, безпосередньо в системах управління електроприводами (PDS, частотні перетворювачі). Для реалізації ідей, покладених у основу вищезазначених стандартів інтеграції необхідна підтримка їх на рівні програмно-технічних засобів. Як показує практика, підтримка наведеного в стандартах функціоналу в конкретних засобах SCADA/HMI сильно відрізняється. Це приводить до того, що більшу частину функціоналу приходится реалізовувати самостійно, що найпростіше і гнучкіше зробити в самому програмованому контролері, якщо використовується парадигма IEC 61131 або гібридна.



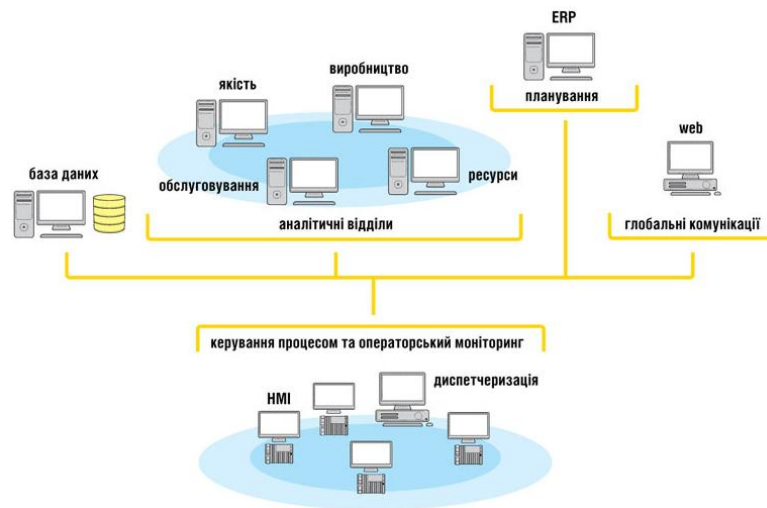
Малюнок 2.5 – Інтегрування Виробництво – Підприємство

Для ефективного проектування під час вдосконалення інтегрованої автоматизованої системи керування виробництвом карамельної маси необхідно

окреслити модель обладнання, що дасть змогу створити єдину функціональну структуру ІАСК кондитерської фабрики відповідно до описаних стандартів.

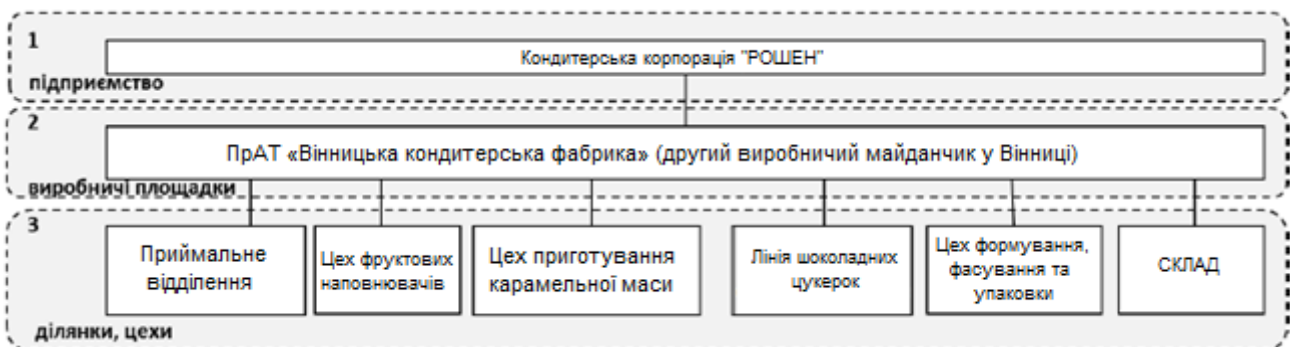
Вдосконалена система повинна мати гнучку мережеву структуру, яка базується на відкритих технологіях та мати можливість передачі технологічної інформації на верхній рівень керування підприємством – ERP.

Послідовність впровадження: специфікація вимог – застосування рішень – інтеграція системи.



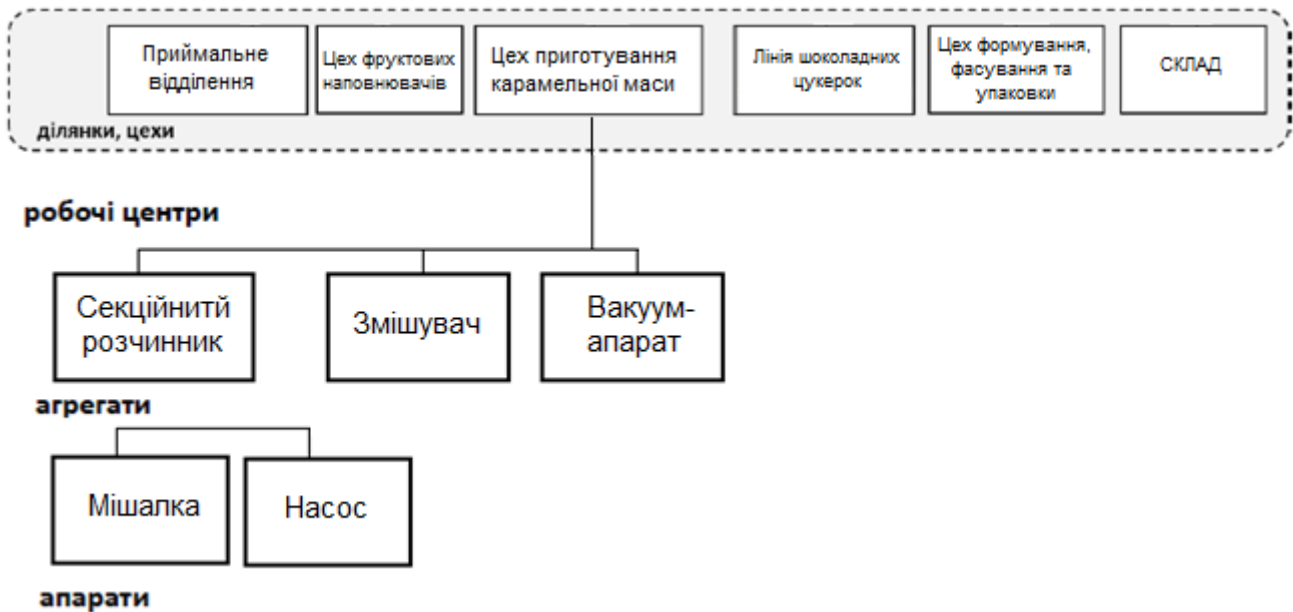
Малюнок 2.6 – Узагальнена діаграма системи, реалізованої засобами HMI/SCADA

На верхньому рівні фізичної моделі обладнання знаходиться Кондитерська Корпорація «Рошен», в яку входить 1 завод, 5 фабрик та Бісквітний комплекс, зокрема і Вінницька кондитерська фабрика, яка займає не останнє місце в ієрархії і є потужною виробничою площадкою. На 3-му рівні розміщено ділянки та цехи фабрики, до яких входить досліджуваний нами цех приготування карамельної маси, деталі якого зображено на малюнку 2.8.



Малюнок 2.7 – Верхні рівні ієрархічної моделі обладнання кондитерської фабрики

На нижніх рівнях фізичної моделі обладнання, рівень деталізації збільшується для робочих центрів (Process Cell) в нашому випадку це цех по приготуванню карамельної маси. На малюнку 2.8 показано апарати та агрегати, модулі контролю, які відносяться безпосередньо до нашого об'єкту.



Малюнок 2.8 – Нижні рівні ієрархічної моделі обладнання лінії виробництва карамельної маси

2.3. Опис функцій, що автоматизуються

Основними технологічними параметрами процесу приготування карамельної маси є витрати основних рецептурних компонентів таких як цукор, гаряча вода, гаряча патока, розчин цукру; температура та рівень в змішувачі та вакуум-апараті, тиск у вакуум-апараті, частота обертів мішалки в змішувачі та швидкість роботи насоса подачі карамельної маси на уварювання.

Для ефективної та адекватної роботи ІАСК потрібен своєчасний обмін інформацією між рівнями управління, між окремим обладнанням всередині рівня, ось тому і треба детально описати параметри, функції, задачі, також встановити між ними зв'язки. Саме за це відповідають інформаційні потоки.

Інформаційні потоки між функціями та задачами передаємо у вигляді стрілок, які вказують на напрямок передачі інформації, або без стрілок, якщо

інформація передається в обидва боки. На малюнку 2.9 для рівня польових ТЗА, можна виділити загалом три типи функцій:

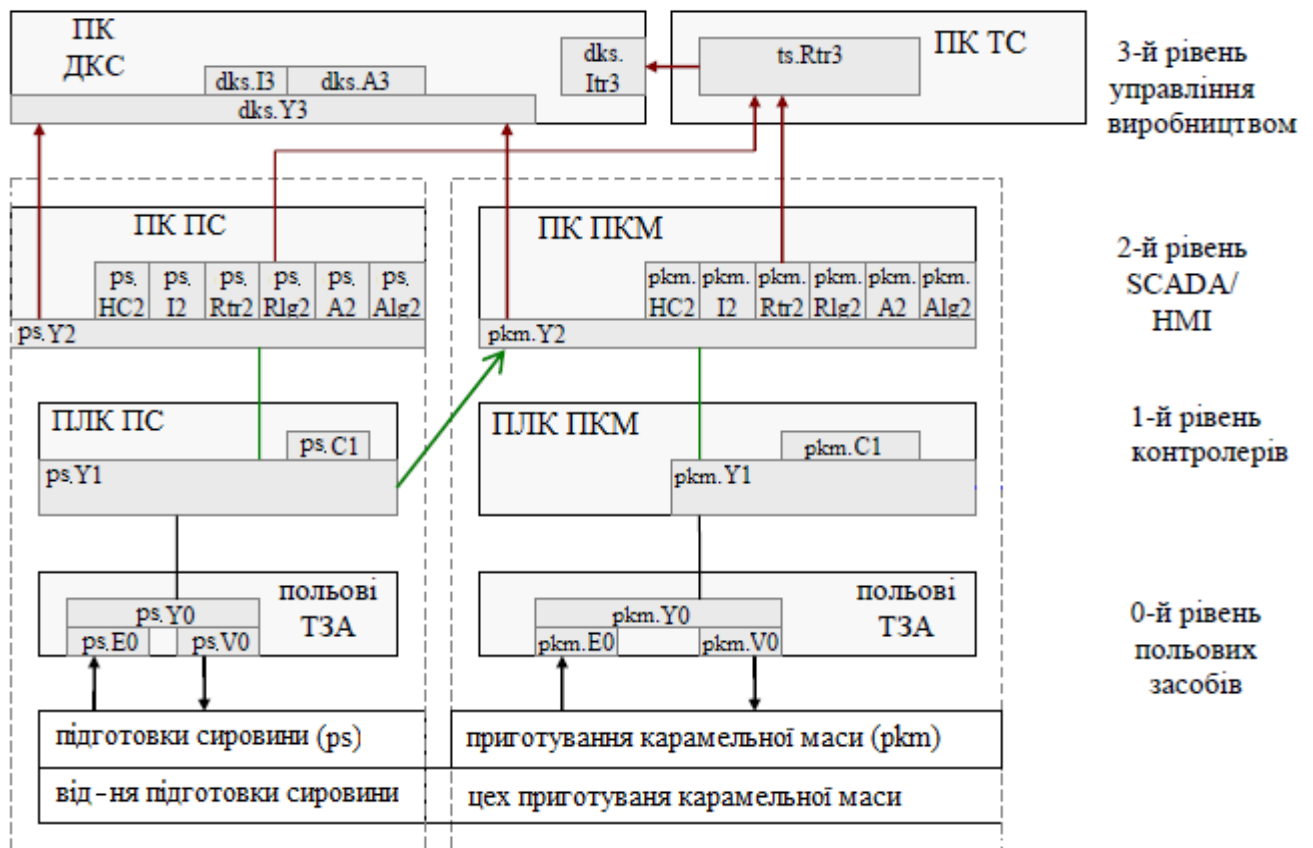
1. Е - вимірювання або первинне перетворення;
2. V - реалізація управляючих дій з використанням виконавчих механізмів;
3. Y - інші типи перетворення.

Усі інші функції можна буде вказати та деталізувати на схемах автоматизації. Всі функції рівня контролерів поєднуємо в дві групи:

1. С - автоматизоване управління, включаючи функції дискретного управління;
2. Y - збір та обробка даних на рівні контролерів, включаючи цифрові інтерфейсні зв'язки.

Для рівня SCADA/HMI та диспетчерського управління:

1. Y - збір та обробка даних реально часу;
2. І - відображення на засобах HMI;
3. R - ведення архіву;
4. А - сигналізація.



Малюнок 2.9 – Фрагмент функціональної структури інтегрованої АСК процесом виготовлення карамельної маси

Таблиця 2.1 – Таблиця умовних позначень до схеми функціональної структури

Позначення	Найменування
Польові ТЗА	Технічні засоби автоматизації, які відносяться до польового рівня (витратоміри, рівнемір, регулятор потоку сипучих матеріалів, частотні перетворювачі, електромагнітні клапани і т.ін.)
ps	Відділення підготовки сировини
рkm	Участок приготування карамельної маси
ПЛК ПС	Промисловий контролер для відділення підготовки сировини
ПЛК ПКМ	Промисловий контролер для участку приготування карамельної маси
ПК ПС	Автоматизоване робоче місце оператора відділення підготовки сировини (на базі комп'ютера)
ПК ЛМК	Автоматизоване робоче місце оператора участку приготування карамельної маси (на базі комп'ютера)
ПК ДКС	диспетчерсько-координуюча станція – автоматизоване робоче місце відповідального зміни (на базі комп'ютера)
ПК ТС	Технологічний сервер виробництва карамелі, архів основних виробничих параметрів
E0, ps.E0, рkm.E0	Вимірювання, перетворення сигналів
ps.V0, рkm.V0	Управління технологічним обладнанням та виконавчими механізмами
ps.Y1, рkm.Y1	Збір та обробка даних на рівні контролерів, включаючи цифрові інтерфейсні зв'язки
ps.C1, рkm.C1	Автоматизоване регулювання та управління технологічним процесом, включаючи дискретне управління
ps.Y2, рkm.Y2, dks.Y3	Збір та обробка даних на рівні SCADA/HMI (база даних реально часу)
ps.HC2, рkm.HC2	Дистанційне управління, формування завдання, настройка

	регуляторів, включення, відключення, переключення, блокування, запуск задач, зміна режимів роботи регуляторів
ps.I2, pkm.I2	Відображення задля контролю за технологічним процесом
dks.I3	Відображення для диспетчерського контролю за виробничим процесом
dks.Itr3	Відображення архівних даних по всьому виробництву
ps.Rtr2, pkm.Rtr2	Ведення трендового архіву технологічного процесу
dks.Rtr3	Ведення трендового архіву виробництва
ps.Rlg2, pkm.Rlg2	Ведення журналу повідомлень
ps.A2, pkm.A2	Контроль стану обладнання, сигналізація (алярми та події)
ps.Alg2, pkm.Alg2	Ведення журналу подій та алярмів

В своїй роботі в описі автоматизованих функцій розкриваю та деталізую схему функціональної структури. За допомогою табл..2.2 описую:

- перелік функцій-задач та вимоги до періодичності і тривалості їх виконання;
- перелік сигналів та даних, які формують інформаційні зв'язки між функціями/задачами;
- вимоги до періодичності відновлення сигналів та даних на входах функцій-задач.

Таблиця 2.2 – Перелік змінник для АСУТП процесу приготування карамельної маси

№	Найменування змінної	Полюві ТЗА ПКМ		ПЛК ПКМ		SCADA ПКМ						
		pkm.E0	pkm.V0	pkm.Y1	pkm.C1	pk m.Y2	pkm.I2	pkm.HC2	pkm.Rtr2	pk m.Rlog2	pkm.A2	pkm.Alog2
1	F_цукру	560 г/хв	-	IN	pkm.F1C1	IN	1с	+	10с, 1міс	1міс	<560 >560	1 міс
2	Кл подачі цукру в секційний розчинник	-	0-100 %	OUT	pkm.F1C1	IN/OUT	1с	+	10с, 1міс	-	-	-
3	Рег F_цукру	-	-	-	pkm.F1C1	IN/OUT	нс	+	змін, 1міс	-	-	-

4	Рег F_цукру, Min	-	-	-	pkm. F1C1	IN/OUT	нс	+	10с, 1міс	-	-	-
5	Рег F_цукру, Max	-	-	-	pkm. F1C1	IN/OUT	нс	+	10с, 1міс	-	-	-
6	Рег F_цукру, Кр	-	-	-	lmk. F1C1	IN/OUT	нс	+	-	-	-	-
7	Рег F_цукру, Ti	-	-	-	lmk. F1C1	IN/OUT	нс	+	-	-	-	-
8	F_гарячої води	56 л/хв	-	-	pkm. F2C1	IN/OUT	1с	+	10с, 1міс	1 міс	<56 >56	-
9	Кл подачі гарячої води в секційний розчинник	-	0-100 %	OUT	pkm. F2C1	IN/OUT	1с	+	10с, 1міс	-	-	-
10	Рег F_гарячої води	-	-	-	pkm. F2C1	IN/OUT	нс	+	3мін, 1міс	1міс	-	-
11	Рег F_гарячої води, Min	-	-	-	pkm. F2C1	IN/OUT	нс	+	10с, 1міс	-	-	-
12	Рег F_гарячої води, Max	-	-	-	pkm. F2C1	IN/OUT	нс	+	10с, 1міс	-	-	-
13	Рег F_гарячої води, Кр	-	-	-	lmk. F2C1	IN/OUT	нс	+	-	-	-	-
14	Рег F_гарячої води, Ti	-	-	-	lmk. F2C1	IN/OUT	нс	+	-	-	-	-
15	F_розчину цукру	-	-	IN	pkm. F13C1	IN	1с	+	10с, 1міс	1міс	-	1 міс
16	Кл подачі розчину цукру в змішувач	-	0-100 %	OUT	pkm. F3C1	IN/OUT	1с	+	10с, 1міс	-	-	-
17	Рег F_розчину цукру	-	-	-	pkm. F3C1	IN/OUT	нс	+	3мін, 1міс	-	-	-
18	Рег F_розчину цукру, Min	-	-	-	pkm. F3C1	IN/OUT	нс	+	10с, 1міс	-	-	-
19	Рег F_розчину цукру, Max	-	-	-	pkm. F3C1	IN/OUT	нс	+	10с, 1міс	-	-	-
20	Рег F_	-	-	-	lmk.	IN/	нс	+	-	-	-	-

	розчину цукру, Кр				F3C1	OU T						
21	Рег F_ розчину цукру, Ті	-	-	-	lmk. F3C1	IN/OU T	hc	+	-	-	-	-
22	F_патоки	280 г/хв	-	IN	pkm. F4C1	IN	1c	+	10с, 1mic	1mic	<280 >280	1 mic
23	Кл подачі патоки в змішувач	-	0-100 %	OUT	pkm. F4C1	IN/OU T	1c	+	10с, 1mic	-	-	-
24	Рег F_патоки	-	-	-	pkm. F4C1	IN/OU T	hc	+	3мін, 1mic	-	-	-
25	Рег F_патоки, Min	-	-	-	pkm. F4C1	IN/OU T	hc	+	10с, 1mic	-	-	-
26	Рег F_патоки, Max	-	-	-	pkm. F4C1	IN/OU T	hc	+	10с, 1mic	-	-	-
27	Рег F_патоки, Кр	-	-	-	lmk. F4C1	IN/OU T	hc	+	-	-	-	-
28	Рег F_патоки, Ті	-	-	-	lmk. F4C1	IN/OU T	hc	+	-	-	-	-
29	T_змішувач	100±5 °C	-	IN	lmk. T1C1	IN	1c	-	10с, 1mic	-	<95 >105	1 mic
30	P_BA	0,6 МПа	-	IN	lmk. P1C1	IN	1c	-	10с, 1mic	-	<0,6 >0,6	1 mic
31	T_BA	125±2 °C	-	IN	lmk. T2C1	IN	1c	-	10с, 1mic	-	<123 >127	1 mic
32	L_BA	90%	-	-	lmk. L1C1	IN/OU T	1c	+	10с, 1mic	-	<90 >90	1 mic
33	SIC_к-ть обертів мішалки	670 об/хв.	-	IN	lmk. SIC M1C1	IN	1c	-	10с, 1mic	-	<670 >670	1 mic
34	SIC, Рег швидкості оберт.двиг. мішалки	-	-	-	lmk. SIC M1C1	IN/OU T	hc	+	3мін, 1mic	1mic	-	-
35	SIC, Рег швидкості оберт.двиг. мішалки Min	-	-	-	lmk. SIC M1C1	IN/OU T	hc	+	10с, 1mic	-	-	-
36	SIC, Рег швидкості оберт.двиг. мішалки Max	-	-	-	lmk. SIC M1C1	IN/OU T	hc	+	10с, 1mic	-	-	-
37	SIC, Рег	-	-	-	lmk.	IN/	hc	+	-	-	-	-

	швидкості оберт.двиг. мішалки Кр				SIC M1C1	OU T						
38	SIC, Рег швидкості оберт.двиг. мішалки Ті	-	-	-	lmk. SIC M1C1	IN/ OU T	hc	+	-	-	-	-
39	SIC, Рег швидкості оберт.двиг. носоу	100 об/хв.	-	-	lmk. SIC M2C1	IN/ OU T	hc	+	3мін , 1mic	1mi с	<100 >100	-
40	SIC, Рег швидкості оберт.двиг. носоу Min	-	-	-	lmk. SIC M2C1	IN/ OU T	hc	+	10с, 1mic	-	-	-
41	SIC, Рег швидкості оберт.двиг. носоу Max	-	-	-	lmk. SIC M2C1	IN/ OU T	hc	+	10с, 1mic	-	-	-
42	SIC, Рег швидкості оберт.двиг. носоу, Кр	-	-	-	lmk. SIC M2C1	IN/ OU T	hc	+	-	-	-	-
43	SIC, Рег швидкості оберт.двиг. носоу Ті	-	-	-	lmk. SIC M2C1	IN/ OU T	hc	+	-	-	-	-

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ПІДСИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ

Комплекс програмного і технічного обладнання, який автоматично контролює технологічний процес і здійснює управління об'єктом, виходячи з заданих параметрів називається автоматизованою системою керування технологічним процесом (АСК ТП).

Підсистема управління процесом виготовлення карамельної маси на базовому рівні складається з технічних пристроїв автоматизації, які впроваджені в технологічну схему і дозволяють отримувати дані про процеси та параметри.

На схемі автоматизації процесу виготовлення карамельної маси, що розміщена на аркуші 1 графічного матеріалу проекту, представлено датчики температури, рівня, тиску, витрати, електричні двигуни, клапани регулювання подачі технологічних потоків. Дані технічні засоби підібрані з врахуванням технологічних особливостей саме цього процесу, розкриємо яким чином відбувався вибір.

Обґрунтування вибору технічних засобів для вимірювання, ВМ та РО

Вимірювання витрати

Для даної установки був вибраний електромагнітний витратомір OPTIFLUX 7300, який застосовується для гарячої води, розчиненого цукру в гарячій воді, гарячої патоки та увареної карамельної маси.

OPTIFLUX 7300 (зображений на малюнку 3.1) являє собою електромагнітний витратомір (ЕМР) для вимірювання витрати рідини з дуже низькою провідністю ($\geq 0,05$ мкСм/см). Високотехнологічний витратомір особливо підходить для застосувань з високов'язкими і маслянистими середовищами, схильними до утворення ізолюючої плівки. Він також є оптимальним вибором для застосувань з наявністю високого рівня вібрації і шуму, а також для вимірювання витрати окислюють, абразивних або токсичних хімічних речовин. Герметична, стійка до вакуумним і

температурних навантажень вимірювальна труба з кераміки відповідає вимогам харчової галузі промисловості (FDA, EC1934 / 2004).



Малюнок 3.1 – Електромагнітний витратомір OPTIFLUX 7300

Відмінні риси приладу:

- широкий динамічний діапазон вимірювання витрати в обох напрямках;
- висока хімічна стійкість: призначений для агресивних, токсичних і абразивних середовищ;
- стабільні вимірювання в застосуваннях з високим рівнем перешкод, відсутність ізоляції електродів;
- матеріал первинного перетворювача з 100% антидифузійної кераміки;
- чудова довготривала стабільність і точність вимірювань;
- всебічна діагностика вимірювального пристрою і технологічного процесу (включаючи NE 107);
- фланцеве або сендвіч-виконання;
- опціонально доступна дуже міцна фланцева конструкція для роботи в умовах сильної вібрації;
- підходить для використання в гігієнічних процесах (відповідає вимогами FDA, EC1935 / 2004; сертифікований EHEDG);

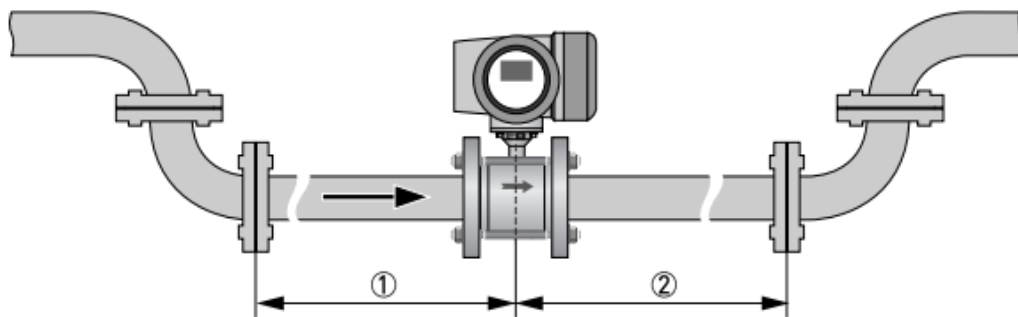
- конструкція з повнопрохідним перетином труби: відсутність рухомих частин, зносу і втрат тиску;
- перевірка витратоміра за місцем експлуатації за допомогою діагностичного пристрою Opticheck.

Типові застосування електромагнітного витратоміру OPTIFLUX 7300:

- для середовищ з дуже низькою провідністю ($\geq 0,05$ мкСм / см) в застосуваннях з підвищеними вимогами;
- токсичні, агресивні і абразивні середовища з вмістом твердих включень до 70%;
- економічно ефективна альтернатива для застосувань, в яких використовуються ультразвукові та коріолісові масові витратоміри.

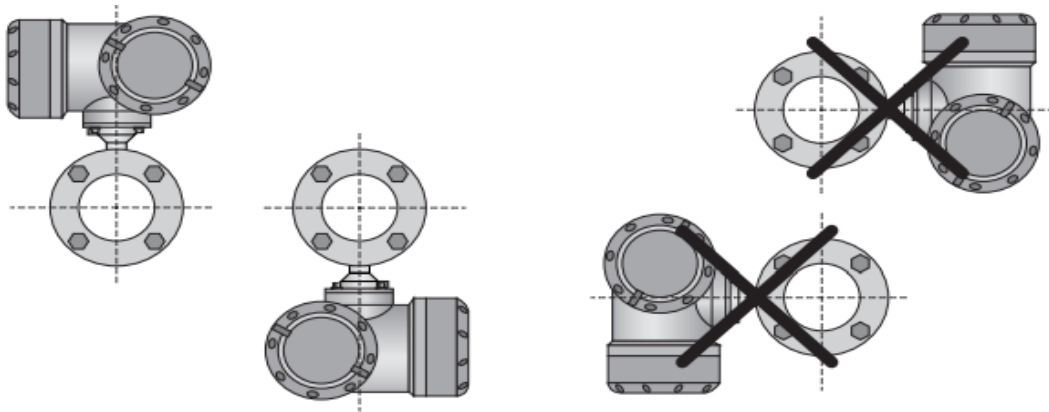
Вимоги до встановлення.

Прямі ділянки трубопроводу до та після приладу



Малюнок 3.2 – Рекомендовані довжини прямих ділянок на вході та виході приладу ($1 \geq 5 DN, 2 \geq 2 DN$)

Монтажне положення приладу



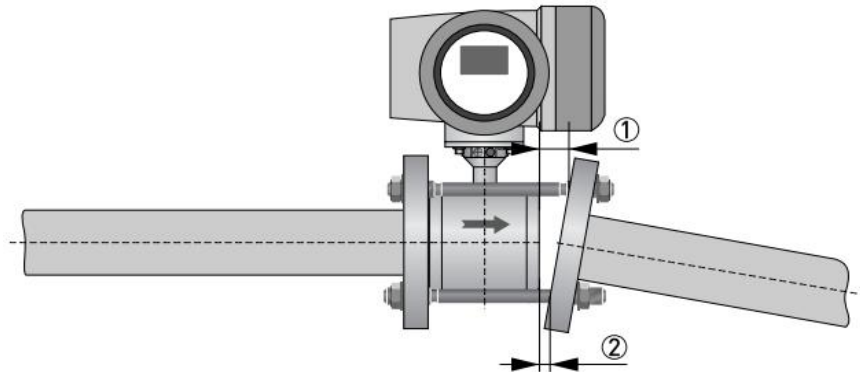
Малюнок 3.3 – Монтажне положення приладу

Відхилення фланців

Обережно!

Максимально допустимі відхилення ущільнювальної поверхні фланців:

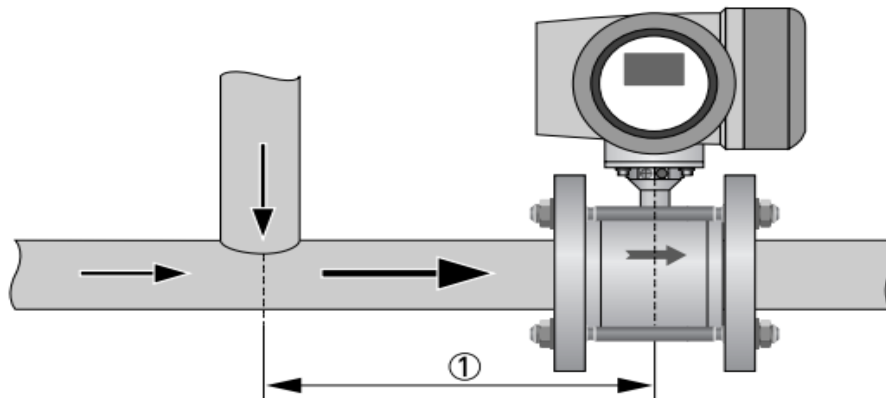
$$L_{\text{макс}} - L_{\text{мін}} \leq 0,5 \text{ мм} / 0,02''$$



Малюнок 3.4 – Відхилення фланців

(1- $L_{\text{макс}}$, 2- $L_{\text{мін}}$)

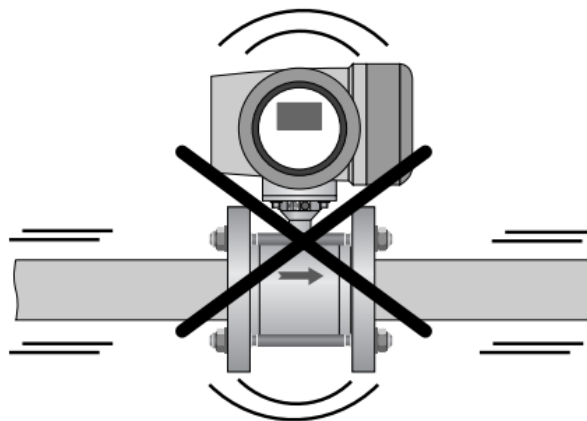
Т-ділянки



Малюнок 3.5 – Дистанція після Т-ділянок

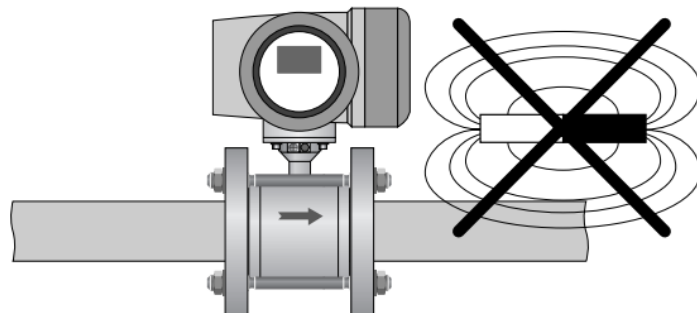
($l \geq 10 \text{ DN}$)

Наявність вібрації



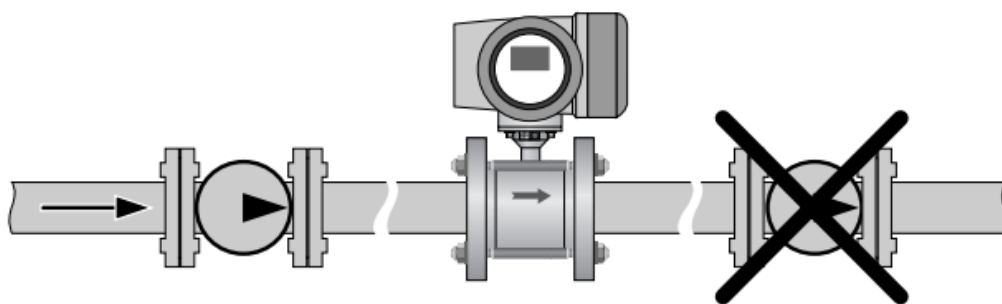
Малюнок 3.6 – Уникайте вібрацій

Зовнішні магнітні поля



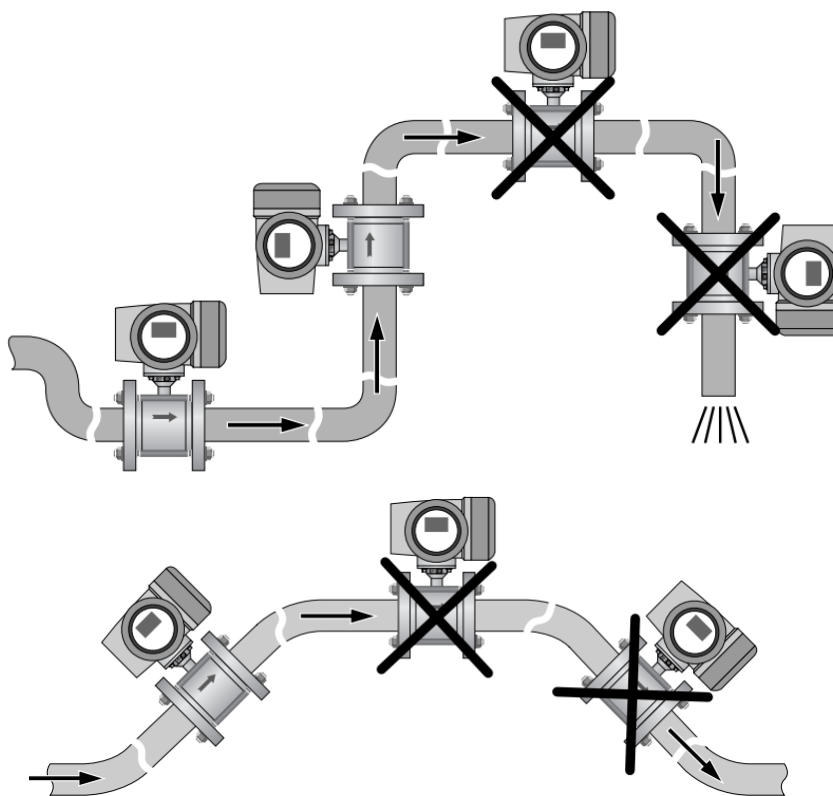
Малюнок 3.7 – Уникайте впливу магнітних полів

Наявність насосу



Малюнок 3.8 – Встановлення після насосу

Вигнуті трубопроводи



Малюнок 3.9 – Варіанти монтажу приладу на вигнутих трубопроводах

Регулятор потоку SolidFlow 2.0 (зображений на малюнку 3.10) використовується для онлайн-вимірювання сипучого матеріалу тобто цукру, та вимірює з можливістю гранул з розміром частинок 1 нм до 10 мм. SolidFlow характеризується простою установкою і зносостійкістю. До його складу входять ще 2 прилади, а саме, бокс C1-Box, та блок оцінки MSE 300-FH.



Малюнок 3.10 – Регулятор потоку сипучих матеріалів SolidFlow 2.0

Принцип дії регулятора потоку сипучих матеріалів регулятору. Датчик працює на базі мікрохвильових технологій та використовується тільки в металевих трубопроводах. Мікрохвилі, стикаючись зі стінками трубопроводу, утворюють вимірювальне поле. Отримана енергія відбивається частинками матеріалу. Регулятор потоку працює як лічильник частинок, який шляхом частотної селекції вважає тільки рухомі частинки в одиницю часу. Калібрування здійснюється на місці установки шляхом натискання на кнопку і введення калібрувального значення.

Технічна характеристика:

- Похибка вимірювання 0,75%
- Вихідний сигнал (аналоговий) 4-20мА
- Діаметр трубопроводу 10-50мм
- Максимальний тиск (МПа) 1,5
- Споживана потужність 7,3 Вт
- Стійкість до вібрації $4,9\text{м/с}^2$

- Напруга живлення 24 DC,
- Пропускна здатність до 20 т/год
- Розмір крупинок від 1 нм до 1 см
- Температура процесу +200°C

Основні області застосування:

- | | |
|---------------------------|----------------------|
| – біомаса; | – вкопні; |
| – виробництво цементу; | – деревообробка; |
| – хімічна промисловість; | – вапняний завод; |
| – вугільна промисловість; | – енергетика; |
| – виробництва покриттів; | – виробництво гіпсу; |
| – харчова промисловість; | – електростанції; |
| – спалювання сміття; | – металургія. |

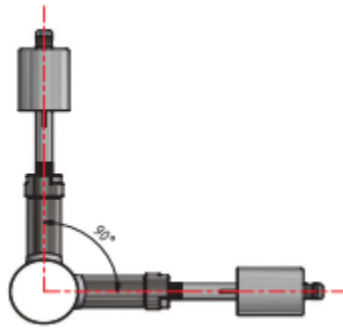
У разі діаметрів труб понад 200 мм використовуються 2 або 3 датчики на кожну точку вимірювання, причому датчики розташовані під кутом 90° або 120° один до одного:

- від діаметра труби 300 мм використовується 2 датчика. Датчик повинен бути встановлений зі зміщенням відносно один одного під кутом 90° (зображено на малюнку 3.11).
- з діаметра труби 400 мм використовується 3 датчика. Датчик повинен бути встановлений зі зміщенням відносно один одного під кутом 120° (зображено на малюнку 3.12).

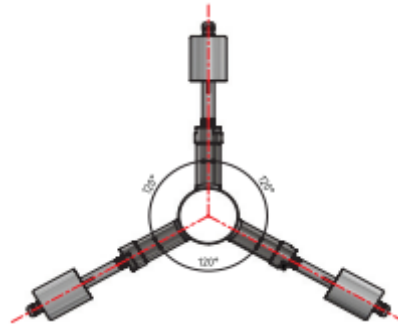
В умовах вільного падіння (наприклад, після гвинтів конвеєра або поворотних конвеєрів) ідеально підходить вхідний шлях (висота падіння) не менше 300 мм. Більш короткі вхідні шляхи можливі за домовленістю.

Кронштейн датчика (зварювальне гніздо) приварений у зазначеному місці встановлення.

Після цього через кронштейн датчика і стінку труби просвердлюється свердловина діаметром 20 мм. Потім датчик налаштовується на товщину стінки, вставляється і фіксується за допомогою сполучної гайки.



Малюнок 3.11 – Використання 2 датчиків в 1 трубопроводі



Малюнок 3.12 – Використання 3 датчиків в 1 трубопроводі

Вимірювання температури

Термоперетворювач ТХК-2088 К (зображений на малюнку 3.13) призначений для вимірювання температури газоподібних і рідких хімічно неагресивних середовищ, а також агресивних середовищ, які не руйнують матеріал захисної арматури. Забезпечують безперервне перетворення температури в уніфікований вихідний сигнал від 4 до 20 мА.



Малюнок 3.13 – Термоперетворювач ТХК-2088 К

Конструкція і порядок монтажу термоперетворювача ТХК-2088 К.

Датчик складається з первинного термоперетворювача (аналогічний по конструкції термоперетворювачів типу ТХК-2088 К) і вимірювального перетворювача, який монтується в головку типу АГ термоперетворювача.

Для монтажу Термоперетворювача ТХК-2088 К необхідно Встановити термоперетворювач за місцем, відвернути верхні гайки і зняти вимірювальний перетворювач. Під'єднати дроти зовнішнього кабелю живлення до відповідних клем і закріпити однією гайкою та встановити вимірювальний перетворювач в головку термоперетворювачі закріпити його гайками. Способи монтажу датчика, зображені на малюнку 3.14.

Технічні характеристики термоперетворювача ТХК-2088К:

- діапазон вимірювань – від 0 до +600°C;
- споживана потужність: не більше 0.8 Вт;
- вхідний сигнал – від 4 до +20 мА;
- літерне позначення НСХ перетворення (ГОСТ 3044):

для термopара ТХА-2088 К;

- клас (ДОСТ 6616) 1 або 2;
- кількість робочих спаїв для ТХА / К-2088 1 або 2;
- показник теплової інерції, с, не більше:

для перетворювачу температури ТХА / К-2088, 50;

- умовний тиск вимірюваного середовища Р_у, МПа:

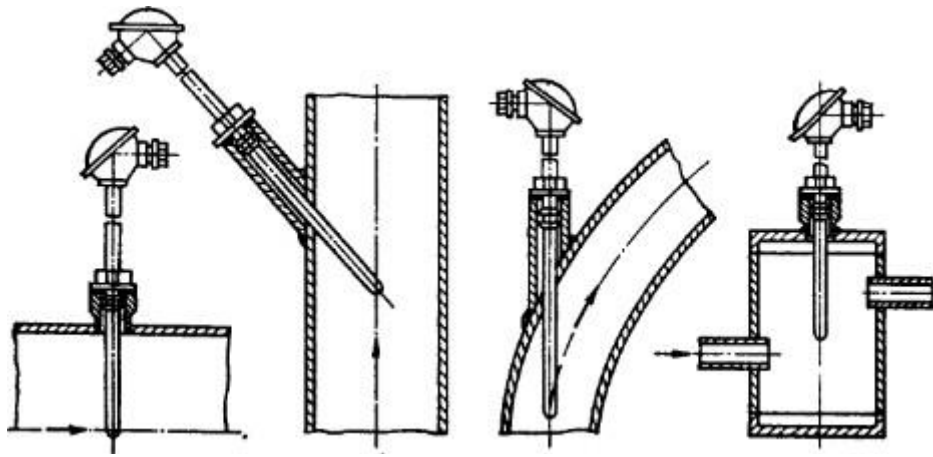
для термоперетворювач ТХА / К-2088 0,4;

- матеріал головки прес матеріалу АГ-4В;
- головка термоперетворювач водозахищеного виконання.

Точність вимірювань температури залежить від структури останніх та їх правильної установки. Є дві основні вимоги, про які слід пам'ятати:

а) Необхідно забезпечити правильний контакт між поверхнею, що вимірюється і термopарою

б) У точці вимірювання не повинно бути підведення або відведення тепла.



Малюнок 3.14 – Спосіб монтажу датчика температури

Вимірювання рівня

Ємнісний рівнемір VEGACAL 62 (зображений на малюнку 3.15) призначений для безперервного вимірювання рівня в будь-яких галузях промисловості у даній системі автоматизації використаний у якості сигналізатора рівня.

Частково ізолюваний зонд VEGACAL 62 може застосовуватися на сипучих продуктах, а також на непровідних рідинах, наприклад нафти.

Схема підключення рівнеміра VEGACAL 62 на малюнку 3.16.



Малюнок 3.15 – Зовнішній вигляд VEGACAL 62

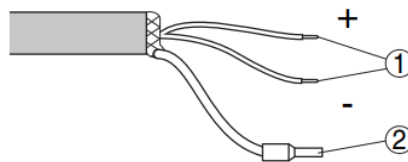
Особливості:

- Міцність і експлуатація без обслуговування;
- Висока функціональна надійність;
- Простота монтажу та початкової установки;

- Вимірювання по всій довжині зонда вкорочують зонд;

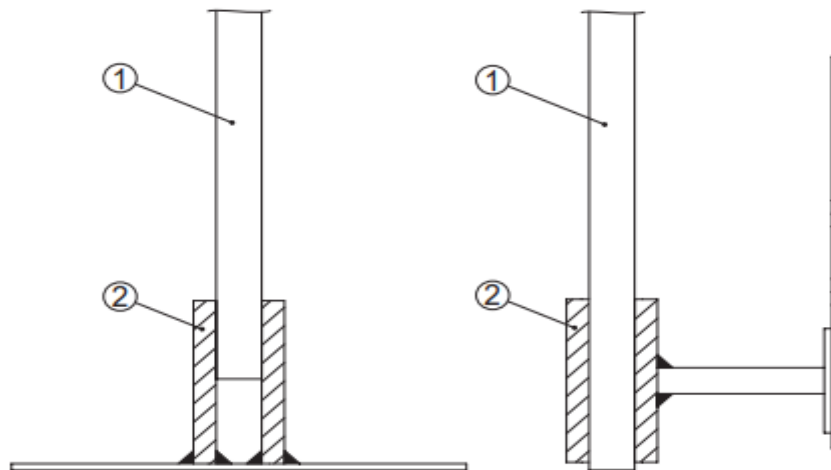
Технічні дані:

- Виконання: Частково ізолюваний стрижень;
- Діапазон вимірювання: до 6 м;
- Приєднання: Різьба від G½, ½ NPT, фланці від DN 25, 1 ;
- Температура процесу: -50 . . . +200 ° C;
- Тиск процесу: -1 . . . +64 бар (-100 . . . +6400 кПа).



Малюнок 3.16 – Схема підключення витратоміра VEGACAL 62

Під час роботи вимірювальний зонд не повинен торкатися внутрішніх конструкцій чи стінки ємності(зображено на малюнку 3.17). Крім того, вимірне значення може змінюватися, якщо відстань від стінки значно коливається. Тому рекомендується ізолююче закріплення кінця зонда.



Малюнок 3.17 – Фіксація вимірювального зонду

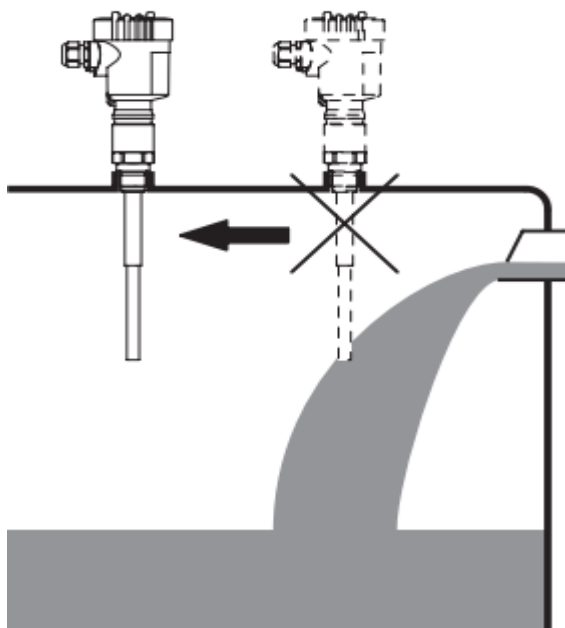
(1 - вимірювальний зонд, 2 - пластикова муфта)

На ємностях із конічним днищем датчик рекомендується монтувати по центру ємності, щоб вимірювання було можливо до дна ємності.

Монтаж пристрою в зоні струменя заповнення може призвести до небажаних помилок виміру. Тому рекомендується монтувати пристрій на

такому місці в ємності, де не буде перешкод від заливних отворів, мішалок тощо(зображено на малюнку 3.18).

Ця рекомендація діє, перш за все, для датчиків з довгим електродом.



Малюнок 3.18 – Продукт, що заливають

Вимірювання тиску

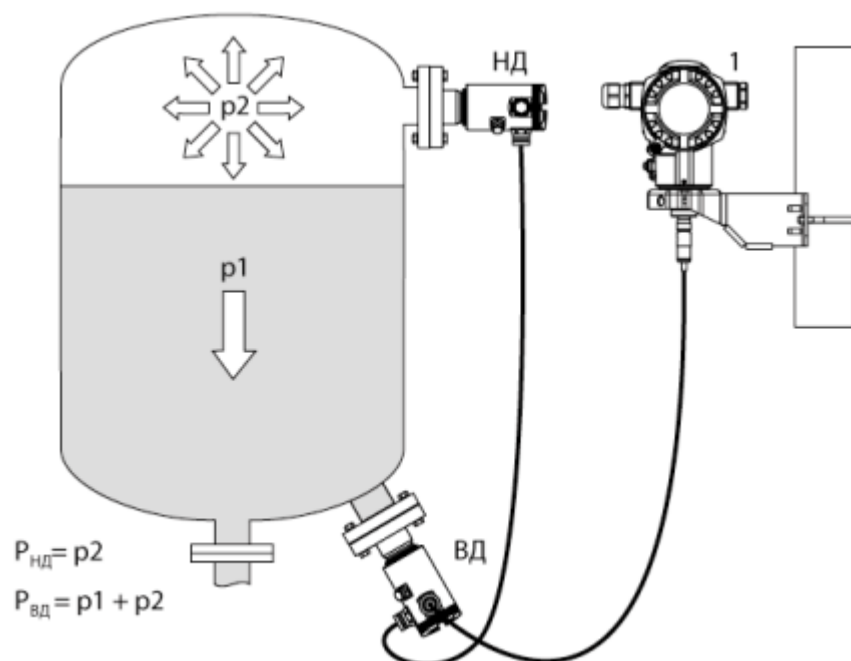
Електронна система вимірювання перепаду тиску Deltabar FMD71 (зображений на малюнку 3.19) призначена для вимірювання тиску, об'єму або маси рідин у резервуарах, що знаходяться під тиском, або дистиляційних колонах/випарників. Датчик високого тиску (HP) вимірює гідростатичний тиск. Датчик низького тиску (LP) вимірює тиск над водяним стовпом. Рівень обчислюється у перетворювачі HS з використанням двох цифрових значень. Ця система позбавляє традиційних проблем вимірювання перепаду тиску.



Малюнок 3.19 – Зовнішній вигляд Deltabar FMD71

Характеристики

- Напруга живлення:
 - 4. . . 20 мА, HART
 - 12. . . 45V DC (виконання для безпечних зон)
 - 12. . . 30 V DC
- Похибка: 0,075% одного датчика
- Тривала стабільність: 0,05% ВПП/рік для окремого сенсора
- Робоча температура від -25 до $+150^{\circ}\text{C}$
- Температура навколишнього середовища від -40 до $+80^{\circ}\text{C}$
- Робочий діапазон – 100 мбар. . . 40 бар
- Опір вакууму – 0 мбар
- Макс. ширина переналаштування діапазону вимірювання – 100:1
- Макс. надлишковий тиск – 60 бар
- Заповнююча рідина: Силіконове масло
- Матеріал корпусу Li-Al, нержавіюча сталь.



Малюнок 3.20 – Конструкція приладу

НТ (LP) – Модуль датчика НД (низького тиску);

ВТ (HP) – Модуль датчика ВД (високого тиску);

p_2 – Тиск водного стовпа;

p_1 – Гідростатичний тиск;

1 – Перетворювач.

Загальні інструкції по монтажу:

- Типові місця встановлення модулів датчиків вказані на паспортних табличках:

- Залежно від орієнтації модулів датчиків можливе усунення нульової точки, тобто. При порожньому або частково заповненому резервуарі відображається значення вимірюваної величини може не дорівнювати нулю.

Зміщення нульової точки можна скоригувати:

- Модуль датчиків ВТ слід встановлювати лише під найнижчою точкою вимірювання.

- Модуль датчиків НТ слід встановлювати лише над найвищою точкою вимірювання.

- Не рекомендується встановлювати модулі датчиків у зоні потоку завантажуваного продукту або у точці резервуара, яку можуть впливати імпульси тиску мішалки.

- Забороняється встановлювати модулі датчиків у всмоктувальній ділянці насоса.

- Для спрощення налаштування та функціонального тестування модулів датчиків слід встановлювати за відсічним клапаном.

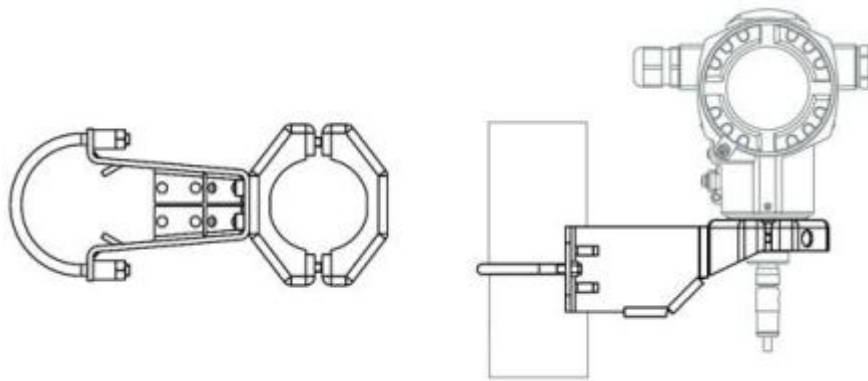
- При охолодженні (наприклад, холодною водою) нагрітого модуля датчика під час очищення на нетривалий час виникає вакуум, внаслідок чого можливе проникнення вологи в датчик через отвір компенсації тиску. У цьому випадку слід встановити датчик так, щоб отвір для компенсації тиску виявився внизу.

- Не допускайте забруднення отвору для компенсації тиску та фільтра GORE-TEX.

– Не допускається очищення мембран та дотик до мембран жорсткими чи гострими предметами.

Монтаж перетворювача виконується із застосуванням монтажного кронштейна (зображено на малюнку 3.21) з комплекту постачання. Монтажний кронштейн можна встановлювати на трубах діаметром 1 1/4 " . . . 2" або на стіні.

У разі монтажу на трубі гайки на кронштейні повинні бути затягнуті рівномірно крутним моментом не менше 5 Нм.



Малюнок 3.21 – Монтажний кронштейн входить до комплекту постачання

Насос

Насос Bellin типу L (зображений на малюнку 3.22). «Ексцентрикові гвинтові насоси» - це насоси, двома основними частинами яких є «ротор» (гвинт з круглою різьбою), який не симетрично відносно центру обертається всередині нерухомої гумової частини, «статора» (вулканізована гума в сталевому циліндрі) - переміщуючи рідину по різноманітних порожнинах вздовж осі насосу.



Малюнок 3.22 – Насос Bellin типу L

В ексцентрикових гвинтових насосів Bellin є багато переваг над іншими типами насосів, що дозволяє використовувати їх в широкому діапазоні:

- низька швидкість і відповідно більш тривалий термін використання (200-500 об. /хв. в порівнянні з 1400-2800 об/хв відцентрових насосів);
- може застосовуватись для перекачування абразивних та в'язких речовин;
- рівномірний потік з мінімальною пульсацією та деформацією;
- висока міцність на старання;
- мінімальне техобслуговування;
- малошумний;
- пропускна здатність до 260 м3/год;
- тиск до 30 бар;
- пряма залежність пропускної здатності від швидкості дає можливість використовувати насоси Bellin для дозування.

Частотний перетворювач

Перетворювач частоти Mitsubishi серії FR-D720 (зображений на малюнку 3.23), являє собою багатофункціональний сучасний контролер для

управління роботою асинхронних електродвигунів малої і середньої потужності



Малюнок 3.23 – Частотний перетворювач Mitsubishi серії FR-D720

Характеристики:

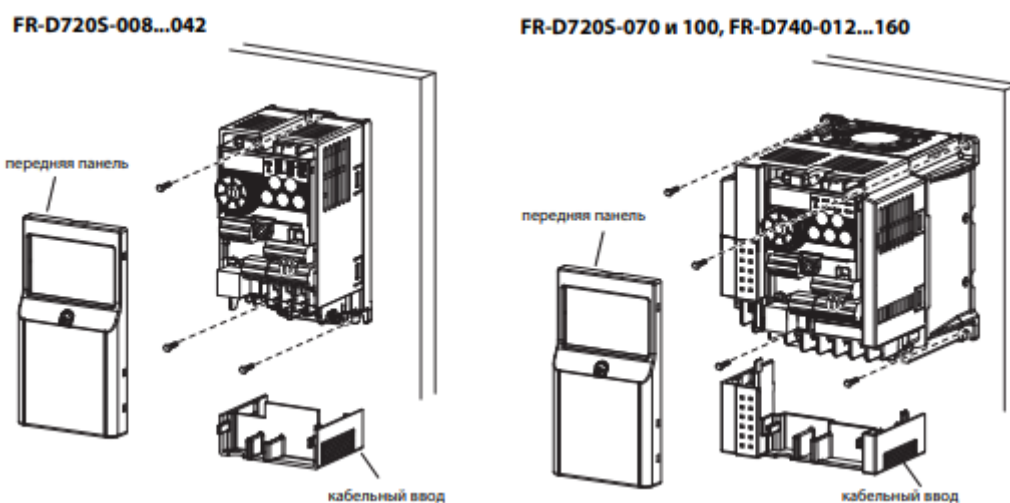
- Тип – перетворювач частоти і числа фаз;
- Вид фазові – на змінному струмі;
- Сфера застосування – для електродвигунів;
- Спосіб управління – керовані;
- Тип схем – трифазні;
- Напруга на вході – 220 В;
- Потужність – 1,5 кВт;
- Струм – 7 А

Зовнішні умови частотного перетворювача Mitsubishi серії FR-D720:

- температура навколишнього середовища: -10°C до + 50°C (без інію);
- температура зберігання: 20°C до + 65°C;
- допустима відносна вологість повітря: макс. 90% (без конденсату);
- висота над рівнем моря: макс. 1 км над рівнем моря;
- клас захисту: IP 20;

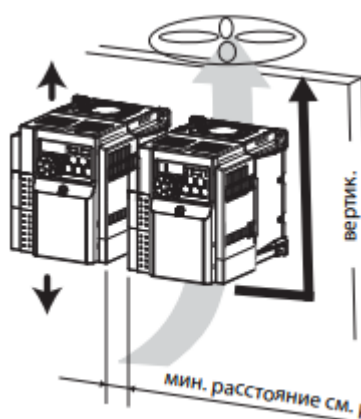
Монтаж. Завжди монтуйте перетворювачі вертикально. Їх не можна встановлювати горизонтально або "лежачому" положенні, так як в цьому випадку неможлива достатня вентиляція.

Перед монтажем видаліть передню панель та кабельне введення.

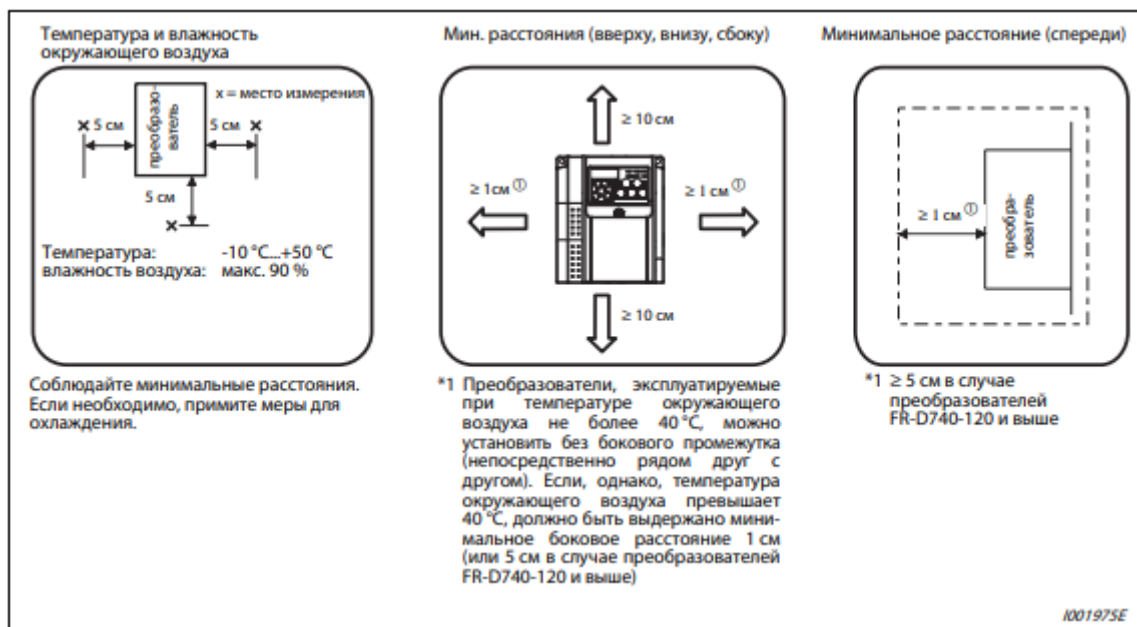


Малюнок 3.24 – Установка на монтажной плате шкафы управления

Якщо в розподільчій шафі потрібно розмістити кілька перетворювачів частоти, то їх слід розташувати поруч один з одним (тобто в ряд). Крім того, для забезпечення нормального охолодження повинні дотримуватися мінімальних відстаней.



Малюнок 3.25 – При вертикальній установці перетворювачів частоти їх розташування на одному рівні (у ряд) та дотриманні мінімальних відстаней забезпечується хороше відведення тепла.



Малюнок 3.26 – Мінімальні зазори

Двигун

Для даної установки був вибраний Асинхронний трифазний електродвигун Двигун Able MS90S-4 (зображений на малюнку 3.27)

Габаритні і приєднувальні розміри, якими характеризуються електродвигуни трифазні, відповідають загальноприйнятому стандарту ІЕС. Достатня продуктивність, низький рівень шуму, невелика вібрація, а також безпеку і надійна робота.

Особливості:

- захист ip55;
- монтаж в будь-якому положенні;
- алюмінієва рама;
- кабельна муфта високої міцності;
- захист ротора від корозії;
- лакофарбове покриття;
- ізоляція класу b або класу f.



Малюнок 3.27 – Асинхронний трифазний електродвигун

Able MS90S-4

Характеристики:

- Потужність [кВт] – 1. 1;
- Частота обертання [об / хв] – 1400;
- Напруга [V] – 220/380;
- Частота [Гц] – 50;
- Вага, [кг] – 14.

3.1. Схема автоматизації

Вимірювання витрати цукру, що потрапляє в секційний розчинник відбувається за допомогою регулятора потоку SolidFlow 2.0, що використовується для онлайн-вимірювання сипучого матеріалу тобто цукру, та вимірює з можливістю гранул з розміром частинок від 1 мм до 10 мм. Він складається з сенсору (поз. 1а), боксу C1-Box (поз. 1б) та блоку оцінки MSE 300-FH (поз. 1в). З сенсору сигнал поступає в C1-Box та перетворює сигнал та передає його в блок оцінки MSE 300-FH, після чого сигнал подається до ПЛК на вхідний аналоговий модуль. З ПЛК сигнал йде на електромагнітний клапан GEVAX 1961 1/4 (поз. 1в), що регулює подачу цукру в секційний розчинник. Також вся інформація подається до ПК.

Вимірювання витрати гарячої води, розчиненого цукру в воді та гарячої патоки відбуваються за допомогою електромагнітних витратомірів OPTIFLUX 7300 (поз. 2а, 3а, 4а), від них вхідні аналогові сигнали надходять до ПЛК. З ПЛК сигнал йде на електромагнітний клапан GEVAX 1961 1/4 (поз. 2в, 3в, 4в), що регулює подачу гарячої води у секційний розчинник, розчиненого цукру у воді у змішувач, та гарячої патоки у змішувач. Також вся інформація подається на ПК.

Електромагнітний клапан GEVAX 1961 1/4 (поз. 5в), регулює подачу не увареної карамельної маси у вакуум-апарат. Також вся інформація подається до ПЛК.

Вимірювання температури в змішувачі та вакуум-апараті здійснюється термоперетворювачем ТХК-2088 К (поз. 7а, 11а), вимірний сигнал з даного перетворювача надходить на нормуючий перетворювач НПТ-1 (поз. 7б, 11б), з нього сигнал вже надходить до аналогового модуля ПЛК.

Вимірювання тиску в вакуум-апараті здійснюється перетворювачем тиску Deltabar FMD7, що складається з двох модулів – датчиків, що вимірюють робочий тиск (високий тиск НР та низький тиск LP), сигнал з них надходить на первинний перетворювач HS (поз. 8а), після чого сигнал різниці тисків подається на вторинний прилад (поз. 8б), далі вимірний сигнал з даного перетворювача надходить до аналогового вхідного модуля ПЛК.

Управління обертами двигунів М1 та М2 в змішувачі та змієвиковому насосі Bellin L здійснюються за допомогою частотних перетворювачів (поз. 6а, 9а). Сигнали управління двигунами надходять з аналогового модуля виходів ПЛК до частотних перетворювачів. Також вся інформація про управління обертами двигунів надходить до ПК, де відображається швидкість обертання обмоток двигунів.

Вимірювання рівня в змішувачі та вакуум-апараті здійснюється ємнісним рівнеміром VEGACAL 62 (поз. 5а, 10а) з якого уніфікований сигнал 4-20 мА надходить до аналогового вхідного модуля ПЛК.

Таблиця 3.1 – Специфікація приладів та засобів автоматизації польового рівня

№ п/ п	№ поз. за схе- мою	Місце встанов- лення	Найменування і технічна характеристика виробу	Тип, Марка	К- сть	Виробник
1	2	3	4	5	6	7
1	1а, 1б	По місцю	Регулятор потоку сипучих матеріалів в комплекті з C1-Box, MSE 300-FH з уніфікованим вихідним сигналом 4-20мА, напруга живлення 24 DC, пропускна здатність до 20 т/ч, розмір крупинок від 1 нм до 1 см, Температура процесу +200°C,	Solid Flow 2.0	1	ENVEA Process GmbH
2	2а, 2б, 3а, 3б, 4а, 4б	По місцю	Електромагнітний витратомір, тем-ра від -40..100° С, напруга живлення 24 DC, з уніфікованим вихідним сигналом 4-20мА	OPTIF LUX 7300	3	KROHNE Messtechnik GmbH
3	1в, 2в, 3в, 4в, 5в	По місцю	Електромагнітний клапан, напруга живлення 24 DC, Температура- 10°C + 150 °C, Максимальний робочий тиск 16 бар, Максимальний робочий тиск 16 бар	GEVA X 1961 1/4" прямої дії	5	Gevan
4	7а, 11а	По місцю	Термоперетворювач, діапазон вимірювань – від 0 до +600°C, вихідний сигнал – від 4 до +20 мА, напруга живлення 24 DC,	ТХК-2088 К	2	ТЕРА

Таблиця 3.1 – Продовження

1	2	3	4	5	6	7
5	7б, 11б	По місцю	Універсальний нормуючий перетворювач сигналів від темопари та/або термометрів опору в 0(4) – 20мА. Кліматичне виконання -40...+85 °С	НПТ-1	2	Овен
6	5а, 10а	По місцю	Рівнемір, температура процесу: -50 . . . +200 ° С, тиск процесу: -1 . . . +64 бар, діапазон вимірювання: до 6 м, напруга живлення 24 DC, з уніфікованим вихідним сигналом 4-20мА	VEGAC AL 62	2	VEGA Grieshaber KG
7	8а	По місцю	Перетворювач тиску вимірювальний, напруга живлення 24 DC, з уніфікованим вихідним сигналом 4-20мА, Робоча температура –25. . . +150°С,	Deltabar FMD71	1	Endress+ Hauser
8	6а, 9а	На щиті	Частотний перетворювач, потужність 1,5 кВт, напруга живлення 380В.	Mitsubis hi серії FR-D720	2	Mitsubishi Electric

3.2. Схема компонування промислового контролера

Для впровадження системи автоматизації процесом виготовлення карамельної маси мій вибір покладений на програмований логічний контролер ПЛК Modicon M-340.

Контролер Modicon M-340 від Шнайдер Електрик — це серія програмованих логічних контролерів (PLC), призначених для використання в автоматизації промислових процесів і є частиною сімейства Modicon, яке добре відоме у галузі автоматизації завдяки своїй надійності та широким можливостям.



Малюнок 3.28 –Modicon M-340 Шнайдер Електрик

Ось основні характеристики та особливості M-340:

1. Основні характеристики

Продуктивність. Висока продуктивність для обробки великих обсягів даних та виконання складних задач в реальному часі.

Модульність. Модульна структура контролера дозволяє легко адаптувати систему під конкретні потреби та розширювати її.

Програмування. Програмується за допомогою **Unity Pro** — програмного забезпечення від Шнайдер, яке підтримує різні мови програмування, такі як:

- **Ladder Logic (LD)**
- **Structured Text (ST)**

- **Function Block Diagram (FBD)**
- **Instruction List (IL)** (для старіших систем)

Можна також використовувати **SoMachine** для більш простих систем автоматизації.

Швидкість обробки. Велика кількість циклів на секунду, що дозволяє ефективно працювати навіть з найскладнішими задачами.

2. Складові системи Modicon M-340

Центральний процесор (CPU). базовий елемент контролера, який забезпечує обробку даних і керує всіма модулями вводу/виводу.

Модулі вводу/виводу (I/O): забезпечують взаємодію з різними датчиками, актуаторами та іншими пристроями. Існують модулі для аналогових та цифрових сигналів, а також для спеціальних застосувань (наприклад, температурні датчики, лічильники, серійні інтерфейси тощо).

Модулі комунікації: забезпечують взаємодію з іншими контролерами або пристроями через різноманітні протоколи, включаючи **Ethernet/IP**, **Modbus TCP**, **Modbus RTU**, **CANopen**, **Profibus**, **DeviceNet** та інші.

Також підтримується **Web-інтерфейс** для моніторингу та налаштування системи через браузер.

3. Комунікаційні можливості

Modicon M340 підтримує різноманітні протоколи для підключення до інших систем автоматизації або зовнішніх пристроїв:

- **Ethernet/IP** та **Modbus TCP** для мережевих підключень
- **Profibus DP**, **Modbus RTU** для промислових пристроїв
- **CANopen** для спеціалізованих мереж
- **Serial ports** для підключення старих або специфічних пристроїв

4. Переваги

Модульність та гнучкість. Ви можете комбінувати різні модулі для формування оптимальної конфігурації під ваші потреби.

Простота в програмуванні. Завдяки використанню стандартних мов програмування та потужних інструментів розробки (Unity Pro) система є досить зручною в програмуванні та налаштуванні.

Надійність. Висока якість компонентів і конструкції забезпечує стійкість до важких умов експлуатації.

Широка підтримка протоколів. Це дозволяє інтегрувати систему з іншими пристроями, що використовують різні протоколи.

5. Типи процесорів (CPU)

Modicon M-340 CPU. Ці контролери мають вбудовану підтримку для багатьох популярних комунікаційних протоколів, що дозволяє зручно інтегрувати PLC з іншими пристроями.

CPU з розширеними можливостями. Деякі моделі процесорів можуть мати більше пам'яті, швидший процесор та додаткові комунікаційні порти.

6. Модулі вводу/виводу

Цифрові модулі вводу/виводу для підключення до стандартних контактних сигналів.

Аналогові модулі вводу/виводу для роботи з аналоговими сигналами (напруга, струм, температура тощо).

Модулі спеціальних функцій наприклад, для підключення до панелей НМІ, інтерфейсів для датчиків і приводів.

7. Системи управління

Modicon M-340 підтримує як базові задачі автоматизації (включення/вимкнення, регулювання швидкості, контроль температури тощо), так і більш складні системи з автоматичним регулюванням, використанням датчиків, актуаторів і спеціальних алгоритмів.

8. Програмне забезпечення

Unity Pro — це основне програмне забезпечення для програмування та налаштування Modicon M340. Воно надає потужні інструменти для розробки та відладки програм, включаючи графічні інтерфейси та моніторинг.

Також можна використовувати EcoStruxure Control Expert для деяких додаткових можливостей та підтримки складних інтерфейсів.

9. Інтерфейси людина-машина (НМІ)

Modicon M-340 може інтегруватися з різноманітними пристроями НМІ (Human-Machine Interface), які дозволяють оператору контролювати та налаштовувати систему через графічний інтерфейс.

10. Застосування

Промислові процеси. контролери типу М-340 використовуються в таких сферах, як хімічна, фармацевтична, харчова промисловість, а також у системах водопостачання та водовідведення.

Енергетика. автоматизація енергетичних об'єктів, таких як електростанції та підстанції.

Будівництво та інфраструктура. використання в системах управління освітленням, вентиляцією, охороною, в автоматизованих системах обліку та контролю.

11. Підтримка безпеки

Моделі з підтримкою безпеки (Functional Safety) можуть використовуватися в критичних застосуваннях, де необхідне дотримання стандартів безпеки, таких як IEC 61508 або ISO 13849.

Це лише загальний огляд основних характеристик і можливостей контролера М-340. В залежності від наших потреб, ми можемо вибрати різні модулі та конфігурації для оптимального виконання задач автоматизації.

В роботі використовуємо CPU BMX P34 2020 з модулем живлення BMX CPS 2000 див. малюнки 3.29 та 3.30. та повний перелік складових контролера вказаний у табл. 3.3.



Малюнок 3.29 – Центральний процесорний модуль, BMX P34 2020

Всі модулі шасі, включно процесорний, живляться по внутрішній шині від модуля живлення BMX CPS2000. Модуль живлення підбирається по типу живлення (постійний або змінний струм) та споживаної потужності і вставляється у кожне шасі в роз'єми з маркуванням CPS. Розрахунок споживаної потужності залежить від кількості і типу модулів, які встановлюються у шасі. Цей розрахунок можна також виконати у програмування UNITY PRO в процесі конфігурування апаратної частини PLC. Будь який модуль живлення M-340 має аварійне реле, яке відключається при зупинці контролера, або коли система само діагностики виявить некоректне значення вихідної напруги модуля живлення.



Малюнок – 3.30. Модуль живлення, BMX CPS 2000

Згідно з технічним завданням, технологічними особливостями процесу виробництва карамельної маси маємо певний перелік наявних аналогових та дискретних входних/вихідних сигналів. На основі цих даних, що зібрані в табл. 3.2. можемо збирати наче LEGO наш контролер.

Таблиця 3.2 – Вимоги до конфігурації ПЛК

Вимоги	Кількість
Аналогові входи (датчики)	11
Аналогові виходи (частотні перетворювачі)	2
Дискретні виходи (електричні клапана)	5

В табл. 3.3. показаний список складових – модулів нашого ПЛК.

Таблиця 3.3 – Конфігурування ПЛК

Модулі контролера		Примітка
Найменування	Кількість	
BMX P34 2020	1шт	Центральний процесор PLC
BMX CPS 2000	1шт	Блок живлення PLC
BMX AMI 0810	1шт	Модуль аналогових входів (28-ми контактна з'ємна колодка)
BMX AMM 0600	1шт	Модулі аналогових входів та виходів (змішані, 20-ти контактна з'ємна колодка)
BMX DRA 1605	1шт	Модуль дискретних виходів (20-ти контактна з'ємна колодка)

Аналогові входи та виходи

Оскільки в роботі використовуються датчики та перетворювачі з вихідним уніфікованим струмовим сигналом 4-20 мА, зовнішній аналоговий

сигнал 4-20 мА підключаємо до клем модулів входу - BMX АМІ 0810 та виходу - BMX АММ 0600.

Дискретні виходи

Дискретні виходи 0 чи 24В з електричних клапанів підключаємо до клем дискретного модуля BMX DRA 1605

3.3. Схема електрична принципова контурів вимірювання, управління та сигналізації

Принципова схема контурів вимірювання, управління та сигналізації реалізована на аркуші 2 графічного матеріалу проекту.

Для контурів регулювання використовуються електричні клапани GEVAX 1961 1/4" прямої дії з вихідним сигналом 0-24В.

Управління електродвигуном М1, М2 здійснюється через частотний перетворювач Mitsubishi серії FR-D720, забезпечивши можливість змінного безступінчатого регулювання частоти обертання мішалки та насосу подачі неувареної карамелі.

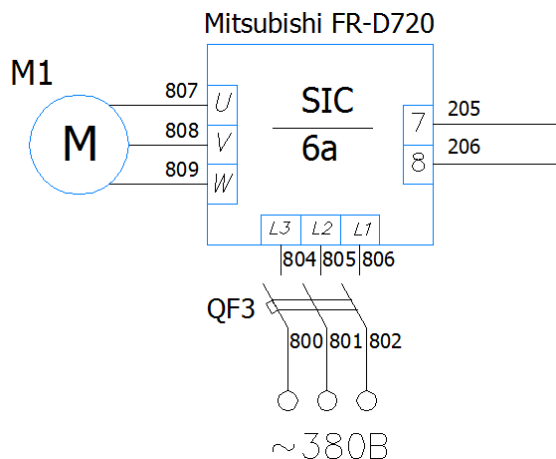
Трифазний двигун з частотним регулюванням є стандартним модулем для безступінчатого регулювання частоти обертання і крутного моменту, економічним і екологічним, який виступає в якості окремого приводу або в якості елемента автоматизованої установки.

Застосування частотного перетворювача забезпечує повне управління обертовим моментом навіть при розгоні і підвищена точність керування швидкістю навіть при малих швидкостях або зупинці.

Частотні перетворювачі підключені до трьохфазного джерела живлення. Через клеми 7, 8 перетворювач підключений до PLC, за допомогою якого відбувається автоматичне регулювання частоти обертання. На виході частотні перетворювачі підключені до відповідних клем U, V, W (три фази А, В, С) асинхронного електродвигуна М1 відповідно.

Частотний перетворювач перетворює напругу постійної величини і частоту живильної мережі в постійну напругу. З такого постійної напруги він

утворює для трифазного двигуна нову трифазну мережу з напругою і частотою змінних величин.



Малюнок 3.31 – Схема управління двигуном за допомогою ЧП

Маркування проводів виконано згідно ГОСТ 2.709-89.

Принципова електрична схема живлення

Проектування систем електроживлення ведуть на основі завдання на проектування, функціональної схеми автоматизації, принципових електричних схем управління та регулювання.

Принципову електричну схему живлення розробляють у такій послідовності: вибирають джерела живлення; вибираються та розраховуються щити і збірки живлення системи автоматизації; проектується живильна мережа; проектується розподільча мережа; виконується принципова схема електроживлення.

У щитах і збірках живлення розташовують апаратуру захисту та управління живильної мережі.

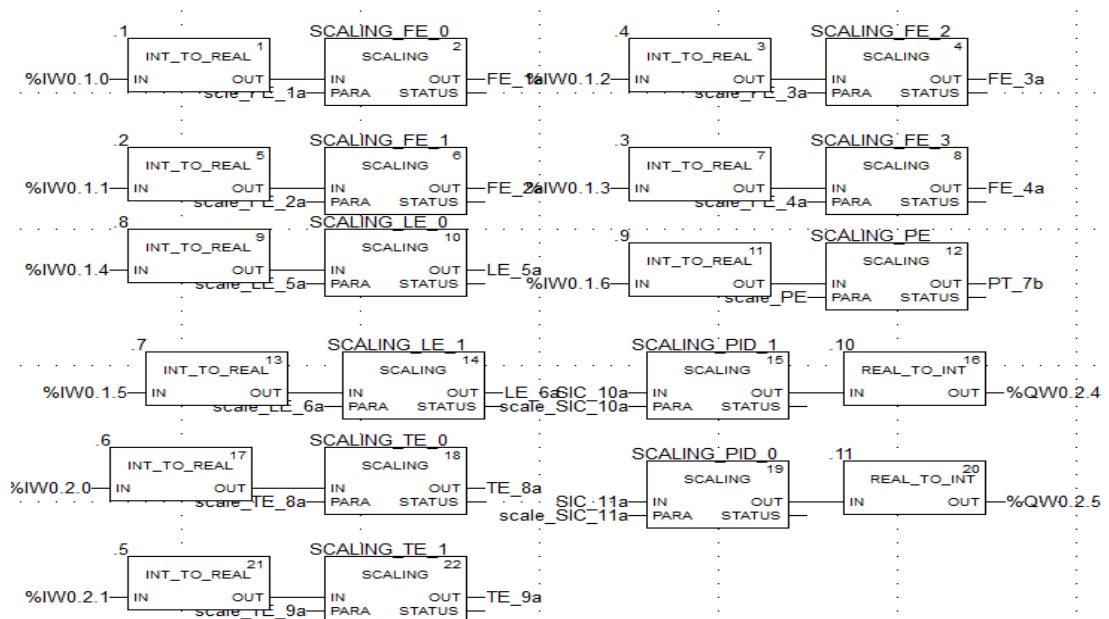
Вибір напруги живильної мережі визначається напругою у колах живлення приладів і засобів автоматизації з урахуванням напруг, прийнятих у системі постачання енергії автоматизованого об'єкту. Найбільше розповсюдження одержали чотирьох провідні мережі трьохфазного змінного струму напругою 380/220В з глухим заземленням магістралі.

Вибір числа фаз і проводів живильної мережі відбувається в залежності від числа фаз і напруги живлення приладів і засобів автоматизації.

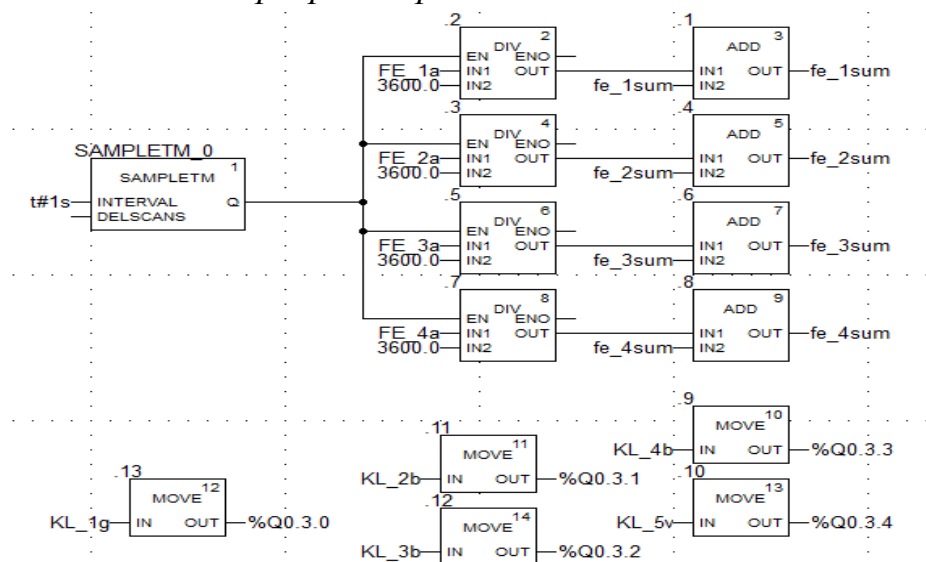
Номінальна напруга апаратів захисту повинна бути більша або дорівнювати номінальній напрузі мережі, а номінальний струм автомата і плавкої вставки - більше розрахунковому струму кола 1 полюса.

При виборі без інерційних запобіжників необхідно враховувати, що плавка вставка не повинна перегорати при короточасних збільшеннях струму кола, наприклад при запуску електродвигунів.

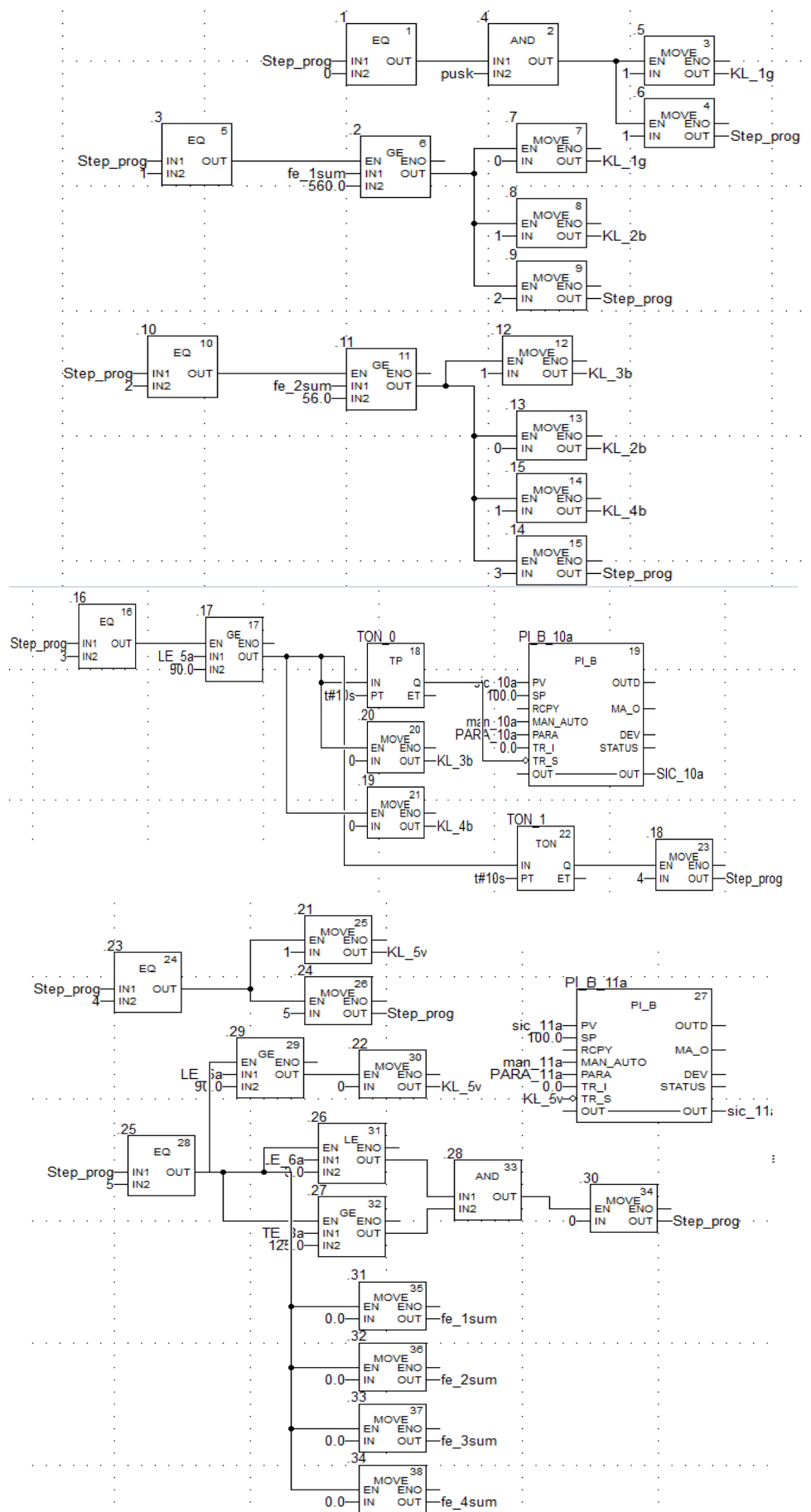
Основна програма процесу виробництва карамельної маси написано на мові FBD див. малюнок 3.34. Окрім основної програми створено дві додаткові секції, які призначені для прив'язки змінних до входів та виходів ПЛК та для підрахунку витрат.



Малюнок 3.32 – Програма прив'язки до входів та виходів ПЛК



Малюнок 3.33 – Програма підрахунку витрат



Малюнок 3.34 – Основна програма процесу

3.4. Схеми з'єднань та підключень проводок промислових мереж

Структурна схема комплексу технічних засобів (КТЗ) розробляється для системи в цілому.

Розробка структури КТЗС передбачає:

- вибір промислових та комп'ютерних мереж, на базі яких проводиться технічна інтеграція засобів;
- створення мережної структури, в якій технічні засоби являються вузлами мережі;
- вибір мережного обладнання (комунікаційні модулі, карти) для всіх мережних вузлів;
- вибір мережних складових з функціями перетворення: репітерів, концентраторів, комутаторів, маршрутизаторів та шлюзів.

Процес створення структури КТЗ може мати ітераційний характер. Спочатку проводиться аналіз функціональної структури, характер і напрямки інформаційних потоків між вузлами, оцінюється інформаційне навантаження. Враховуючи вимоги що дані в завданні, вибирається мережна структура та мережне обладнання. Мережна структура аналізується на придатність. Якщо вона не задовольняє по певним причинам вимогам (не вистачає ресурсів мережі або мережних засобів) - процес повторюється.

Структура КТЗ зображена на аркуші 3 графічної частини. На цій схемі зображена дворівнева схема обчислювальних мереж верхнього (МOM/MES) та нижнього рівнів (PLC-HMI). Верхній рівень управління представлений комп'ютерною обчислювальною мережею (КОМ). Вузли верхнього рівня управління забезпечують управління виробництвом, включаючи модуль керування обладнанням, якістю продукції згідно виробничих стандартів ISA95. В зв'язку з нерівномірним розташуванням робочих станцій на даному об'єкті та порівняно невеликою вартістю комунікаційних пристроїв в магістерській роботі обрано мережу верхнього рівня типу Ethernet. з використанням подвійної екранованої витой пари STP5 SHIPtech. Кабель відповідає специфікації 100BASE-TX. Мережа Ethernet має швидкість

передачі даних 100 Мбіт/с. Мережа основана на з'єднання керованих комутаторів, які в свою чергу можуть виконувати функції моста, тому вона забезпечує гарантовану доставку даних, та високу надійність. Дана мережа на апаратному рівні має вбудовані засоби діагностики і забезпечує завдяки роботі комутаторів швидку передачу пакетів та стабільний трафік, а також має можливість вийти на глобальну мережу Internet та забезпечити керування основним технологічним процесом поза підприємством, на дуже великих відстанях.

Вся мережа верхнього рівня має топологію "зірка" з децентралізованим вузлом комутації SW1. Така побудова має ряд переваг: по-перше топологія "зірка" підвищує надійність мережі, а друга перевага полягає у використанні концентратора з певними властивостями. Даним проектом передбачено застосування комутаторів на 16 портів, які забезпечують детерміновану передачу даних в режимі реального часу, для того, щоб розділити інформаційні потоки та зняти навантаження мережі, підвищивши її продуктивність. Мережа верхнього рівня побудована за дворівневою схемою – клієнт-сервер. В цій схемі одна частина програми функціонує на сервері у вигляді механізму бази даних, інша - на клієнтській машині. В даному випадку від клієнта по мережі передається тільки запит на вибірку чи модифікацію даних, а повертається лише результат цього запиту (який може являти собою лише один рядок таблиці).

На цьому рівні знаходиться диспетчерська координуюча станція ПК ДКС, технологічний сервер ПК ТС та виробнича лабораторія ПК ВЛ. Їхніми основними функціями являється координація системи, зберігання, управління і передача файлів даних як технологічного та технічного характеру. На даному етапі усі змінні в будь-який момент часу, що надходять з рівня АСУТП, де розраховані показники ефективності на кожному етапі виробництва, забиваються в таблиці даних (Excel), зберігаються в архіві даних, звідки будь-який ПК дістає необхідні параметри в той момент часу, коли це потрібно, і обробляє їх відповідно до специфікацій.

Показники якості основної та проміжної продукції аналізуються за допомогою модуля якості Quality Operation Manager, який встановлений на ПК виробничої лабораторії. На основі отриманих з бази даних БД SQL Server показників якості всіх етапів виробництва формуються звіти та передаються на рівень планування та матеріального забезпечення.

Така організація дуже ефективна тому, що із загальною базою даних працює велика кількість користувачів.

Для робочих станцій обрані комп'ютери на базі процесорів Core2 Duo 1.8GHz 1024MbDDR3/160Gb/DVD-RW та Core2 Duo 2,6GHz 2048MbDDR3/400Gb/DVD-RW для технологічного сервера розглядуваної мережі.

Вузли нижнього рівня виконують функції автоматичного контролю та регулювання, логіко-програмного керування приводами та механізмами, сигналізацію стану технологічного процесу і обладнання, тобто аналогічні функціям нижнього рівня управління АСУТП.

Вузли нижнього рівня АСУТП в даному проекті реалізуються з допомогою програмованих логічних контролерів (PLC). Внутрішня структура контролерів – магістральна, тобто до внутрішньої системної шини підмикаються і процесор, і пристрої оперативної та постійної пам'яті, і зовнішні пристрої, і засоби оперативного управління, і пристрої цифрового зв'язку та пристрої зв'язку з об'єктом.

Оскільки в якості промислового логічного контролера використано мікропроцесорний контролер Modicon M-340 з центральним процесором, що передбачає наявність двох роз'ємів один для мережі Modbus, другий для Ethernet, то для зручності і нижній рівень – обмін інформацією між ПЛК суміжних відділень реалізовуємо на Ethernet, а по Modbus RTU підключаємо частотний перетворювач до ПЛК ПКМ.

Для підключення комп'ютерів до обчислювальної мережі використовують комунікаційні карти PCI.

Modbus - комунікаційний протокол, заснований на технології master-slave. Широко застосовується в промисловості для організації зв'язку між електронними пристроями. Може використовувати для передачі даних через послідовні лінії зв'язку RS-485, RS-422, RS-232, а також мережі TCP/IP (Modbus TCP).

Обрана мною обчислювальна мережа задовольняє поставлені перед нею технічні вимоги, зручна та зрозуміла у встановленні та обслуговуванні. Інтегровані порти Ethernet та Modbus здаходяться безпосередньо в процесорному модулі, що не потребує додаткових пристроїв та знешевлює реалізацію мережі.

Таблиця 3.4 – Специфікація мережних засобів та вузлів

№ п/п	Позначення	Найменування	Назва/ Виробник	К-ть, шт
1	2	3	4	5
1	ПК ДКС ПК ВЛ	Офісний ПК IBM PC сумісний	Core2 Duo 1.8GHz 1024MbDDR3/1 60Gb/DVD-RW	2
2	ПК ТС	Офісний ПК IBM PC сумісний	Core2 Duo 2,6GHz 2048MbDDR3/4 00Gb/DVD-RW	1
3	ПЛК	Програмований логічний контролер Modicon M-340	BMX P34 2020	3
4	ЧП ПКМ	Частотний перетворювач, потужність 1,5 кВт, напруга живлення 380В	Mitsubishi серії FR-D720	1
5	SW1	Мережевий комутатор 8- портовий Switch 10/100M Ethernet	Came Labs Switch	1
6	LAN	Мережева карта PCI для Ethernet 100Base-T4	Intel(R) PRO/100VE Network Connection	9
7	KM1-1, KM1-2, KM1-3	Кабель шини MODBUS з 2- ма роз'ємами RJ45	VW3A8306R30	-

8	КМ1-4 ... КМ1-9	Кабель екранована подвійна вита пара 5-ї категорії з роз'ємами RJ45	IE FC TP кабеля 4x2	-
9	КМ-2-1	Кабель підключення по Modbus RTU	TSX SCPCM4030	
10	M1	Комп'ютерна обчислювальна мережа управління виробництвом	Ethernet 100Base – TX	-
11	M2	Локальна обчислювальна мережа рівня PLC для підключення Mitsubishi серії FR-D720	MODBUS RTU	-

В диспетчерсько- координуючій станції та на ПК в кожному відділенні встановлено **Citect SCADA**, що є потужною платформою, що використовує інтерфейси для збору та обробки даних з різноманітних пристроїв і систем в рамках підприємства. Ця система розроблена для покращення управління виробничими процесами, зниження витрат і підвищення ефективності операцій.

Основні характеристики Citect SCADA.

Моніторинг і керування. Citect SCADA забезпечує реальний моніторинг роботи технологічних процесів, даючи змогу операторам візуалізувати всі параметри, такі як температура, тиск, рівень, швидкість та інші технологічні параметри в реальному часі. Оператори можуть здійснювати керування пристроями, змінюючи налаштування та параметри процесу прямо через інтерфейс SCADA.

Інтерфейс користувача. Citect SCADA має гнучкий і інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, який дозволяє створювати кастомізовані панелі для моніторингу та контролю. Система дозволяє будувати графіки, діаграми, індикатори стану та інші візуальні елементи для кращого відображення поточних даних.

Віддалений доступ і мобільність. Завдяки підтримці віддаленого доступу через інтернет або спеціальні мобільні додатки, оператори можуть контролювати та управляти процесами з будь-якої точки світу.

Інтеграція з іншими системами. Citect SCADA може бути інтегрована з іншими системами автоматизації та підприємствами, що дає змогу об'єднувати різні технологічні процеси в єдину екосистему. Підтримує стандартні протоколи для комунікації з різними пристроями, наприклад, OPC, Modbus, Ethernet/IP.

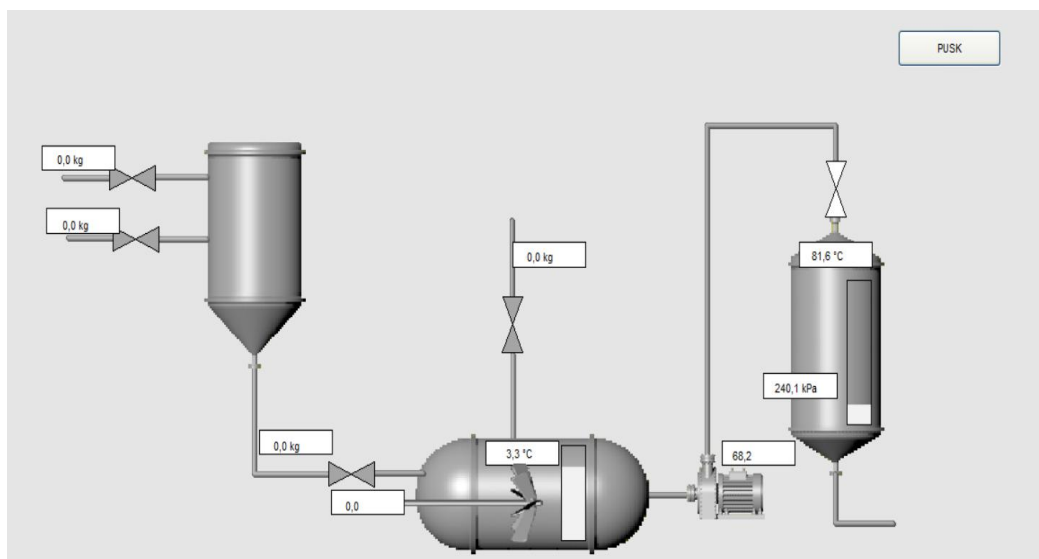
Збір і обробка даних. SCADA-система дозволяє збирати дані з численних датчиків і пристроїв, що використовуються в промислових процесах. Ці дані потім обробляються для аналізу та створення звітів. Всі дані можуть бути збережені в базах даних для подальшого аналізу або архівації.

Автоматизація та контроль. Citect SCADA надає можливість автоматизувати численні операції та процеси, що зменшує потребу в ручному втручанні та забезпечує стабільну роботу системи. Система підтримує налаштування логіки управління та автоматичні відповіді на зміну технологічних параметрів.

Безпека і надійність. Система забезпечує високий рівень безпеки даних, зокрема через використання авторизації користувачів та захисту інформації від несанкціонованого доступу. Висока надійність роботи, що важливо для критичних промислових процесів.

Масштабованість. Citect SCADA можна адаптувати до різних масштабів — від малих підприємств до великих промислових комплексів. Система дозволяє легко масштабувати інфраструктуру відповідно до зростання підприємства або зміни вимог до процесів.

Мнемосхема процесу виготовлення карамельної маси розроблена в SCADA-програмі Citect SCADA.



Малюнок 3.35 – Мнемосхема процесу виготовлення карамельної маси

РОЗДІЛ 4. СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

У сучасному світі інтенсивний розвиток технологій вимагає впровадження новітніх рішень для підвищення ефективності та надійності промислових об'єктів. Одним з таких рішень є використання цифрових двійників.

Цифровий двійник — це точна віртуальна копія фізичного об'єкта або системи, яка відображає його реальний стан в режимі реального часу. Ці моделі дозволяють проводити моніторинг, прогнозування та оптимізацію без необхідності фізичних експериментів або втручань.

Цифрові двійники з використанням методів машинного навчання — це віртуальні моделі реальних об'єктів або систем, які можуть симулювати їхню поведінку та стан за допомогою даних, отриманих з реальних процесів, і методів машинного навчання для вдосконалення цих моделей.

Використання методів машинного навчання для цифрових двійників передбачає.

Навчання на даних. Машинне навчання використовується для навчання цифрового двійника на основі даних, що збираються з фізичних об'єктів (сенсори, контрольні системи, вимірювання). Дані можуть включати параметри, такі як температура, тиск, швидкість, витрата.

Прогнозування поведінки. Використовуючи машинне навчання, цифрові двійники можуть прогнозувати поведінку об'єктів або систем у майбутньому, наприклад, очікувані відхилення або несправності. Методи, такі як нейронні мережі, можуть допомогти створити більш точні моделі для складних або нелінійних систем.

Оптимізація процесів. За допомогою алгоритмів машинного навчання цифрові двійники можуть аналізувати різні варіанти роботи системи й оптимізувати її роботу для досягнення найкращих результатів. Це включає в

себе коригування параметрів в реальному часі для підвищення ефективності або зниження витрат.

Виявлення аномалій. Цифрові двійники, побудовані на основі алгоритмів машинного навчання, можуть виявляти аномалії в системі, наприклад, несправності або відхилення від нормального режиму роботи. Це дає змогу вчасно реагувати на можливі проблеми та запобігти нештатним ситуаціям

Реагування в реальному часі. Застосування машинного навчання дозволяє цифровим двійникам працювати в реальному часі, миттєво адаптуючи свої моделі до нових даних, що надходять від реального об'єкта або системи.

Цифрові двійники, побудовані з використанням методів машинного навчання, відкривають нові можливості для промисловості, забезпечуючи більш ефективне, надійне та економічне управління складними системами.

Основою для створення цифрових двійників є математичні моделі, що дозволяють відтворювати фізичні процеси та взаємодії у віртуальному середовищі. Завдяки методам машинного навчання ці моделі можуть автоматично адаптуватися до змінних умов експлуатації, забезпечуючи високу точність і ефективність прогнозування. Машинне навчання, зокрема нейронні мережі, методи підтримки векторів та інші алгоритми, дозволяє обробляти великі обсяги даних та виявляти приховані закономірності, що недоступні для традиційних методів моделювання.

В роботі необхідно дослідити методи синтезу математичних моделей для цифрових двійників промислових об'єктів з використанням методів машинного навчання. Розглянемо теоретичні основи цифрових двійників, проаналізуємо сучасні методи машинного навчання та їх застосування для моделювання промислових процесів. Практична частина роботи присвячена розробці та реалізації моделей для промислового об'єкта, оцінці їх точності та ефективності.

Це сприятиме покращенню процесів управління та оптимізації виробництва карамельної маси, підвищенню їх надійності та ефективності шляхом використання передових технологій машинного навчання та цифрових двійників.

4.1. Побудова моделей лінійної та нелінійної регресії.

Аналіз даних.

Імпортуємо дані:

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
from scipy.stats import pearsonr
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.metrics import mean_squared_error, r2_score
from sklearn.linear_model import Ridge, Lasso
from sklearn.preprocessing import PolynomialFeatures
from sklearn.model_selection import train_test_split
import tensorflow as tf
from tensorflow.keras.models import Sequential
from tensorflow.keras.layers import Dense, Input
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
from matplotlib.animation import FuncAnimation
from sklearn.metrics import mean_squared_error, r2_score
from tensorflow.keras.layers import Dropout
from tensorflow.keras.regularizers import l2
from sklearn.decomposition import PCA
```

```
# Імпорт датасету
dataX = pd.read_csv(filepath_or_buffer="D:/data/output1X15.csv",header=None,names=['X 1', 'X 2', 'X 3','X 4','X 5','X 6','X 7','X 8','X 9','X 10'])
dataY = pd.read_csv(filepath_or_buffer="D:/data/output1Y15.csv",header=None,names=['Y'])

# 1. Імпорт даних
X = dataX
Y = dataY
```

```
X.head()
```

	X 1	X 2	X 3	X 4	X 5	X 6	X 7	X 8	X 9	X 10
0	0.098536	-1.027781	0.254700	-1.098207	0.070426	-1.418020	-1.305412	0.308483	-1.764977	-0.827229
1	0.580232	0.488923	0.410590	0.689518	-0.200595	-0.564978	1.600215	0.599391	0.355197	0.014880
2	-0.729388	-0.126415	-0.651434	0.177008	-0.303423	0.478909	-0.269872	0.095685	-0.111443	-0.846867
3	-0.302968	-1.696725	-0.052073	-2.730749	1.034023	2.127932	1.656033	-1.058168	0.040967	1.228074
4	0.376380	0.382647	0.258596	-0.678256	1.060903	0.779518	-0.448676	0.591492	-0.544211	-0.014098

```
Y.head()
```

	Y
0	-218.894485
1	98.061924
2	2.815229
3	-163.629423
4	-33.052429

Візуалізуємо дані:

```
cm = "viridis"
c1 = "green"
c2 = "gold"
c3 = "navy"
```

```
# Створимо DataFrame для зручності роботи з даними
df = X
df['Y'] = Y
df = pd.DataFrame(df)

# Визначимо кількість рядків і стовпців для розташування графіків
num_features = len(df.columns) - 1
num_cols = 5 # Кількість стовпців
num_rows = (num_features + num_cols - 1) // num_cols # Кількість рядків

fig, axes = plt.subplots(num_rows, num_cols, figsize=(15, 6))

# Створимо pairplot для кожної пари ознак та залежності від Y
for i, ax in enumerate(axes.flat):
    if i < num_features:
        sns.scatterplot(x=df.columns[i], y='Y', data=df, ax=ax, color=c1)
        ax.set_title(f'{df.columns[i]} vs Y')
    else:
        ax.axis('off') # Прибираємо порожні осі

plt.tight_layout()
plt.show()

# Обчислимо матрицю кореляції Пірсона
correlation_matrix = df.corr()

# Візуалізуємо теплову карту кореляції
plt.figure(figsize=(10, 8))
sns.heatmap(correlation_matrix, annot=True, cmap=cm)
plt.title("Матриця кореляції Пірсона")
plt.show()
```

```

coef_cor = 0.2
coef_cor_X = 0.6
# Визначення найважливішої ознаки
most_important_feature = correlation_matrix['Y'].drop('Y').abs().idxmax()
print(f'Найважливіша ознака: {most_important_feature} (індекс {df.columns.get_loc(most_important_feature)})')

# Визначення ознак з високою кореляцією з Y (> coef_cor)
high_correlation_features = correlation_matrix.index[(abs(correlation_matrix['Y']) > coef_cor) & (correlation_matrix.index != 'Y')].tolist()
print(f'Ознаки з високою кореляцією з Y: > {coef_cor} {high_correlation_features}')

# Визначення ознак з високою кореляцією між собою (> coef_cor)
high_correlation_pairs = []
for i in range(len(correlation_matrix.columns) - 1):
    for j in range(i + 1, len(correlation_matrix.columns) - 1):
        if abs(correlation_matrix.iloc[i, j]) > coef_cor_X:
            high_correlation_pairs.append((correlation_matrix.columns[i], correlation_matrix.columns[j]))

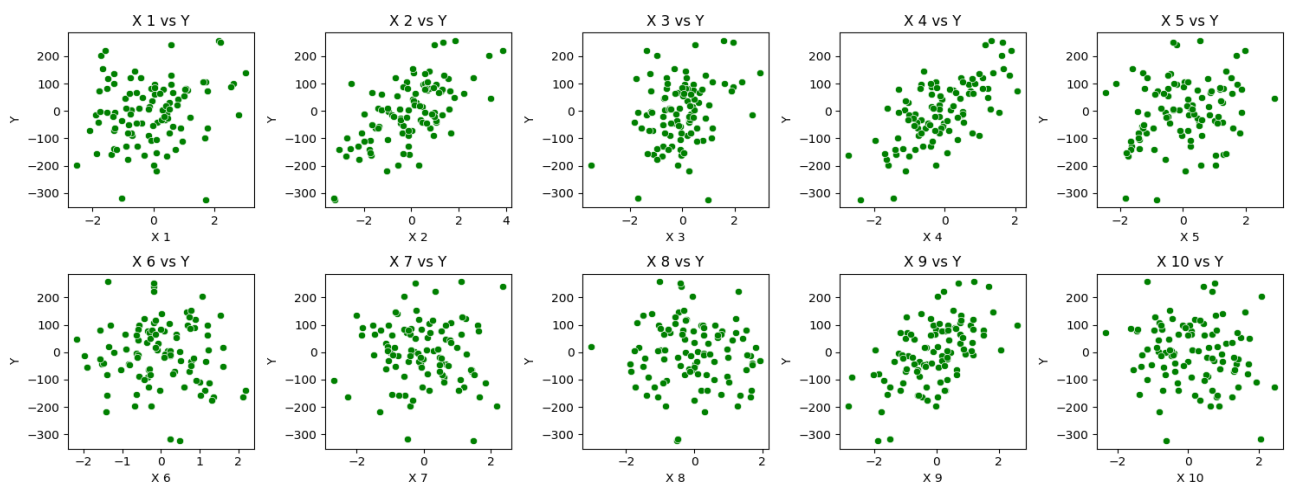
print(f'Пари ознак з високою кореляцією: {high_correlation_pairs}')

# Видалення ознак з високою кореляцією між собою
features_to_remove = set()
for feature1, feature2 in high_correlation_pairs:
    if feature1 in high_correlation_features and feature2 in high_correlation_features:
        if abs(correlation_matrix.loc[feature1, 'Y']) > abs(correlation_matrix.loc[feature2, 'Y']):
            features_to_remove.add(feature2)
        else:
            features_to_remove.add(feature1)

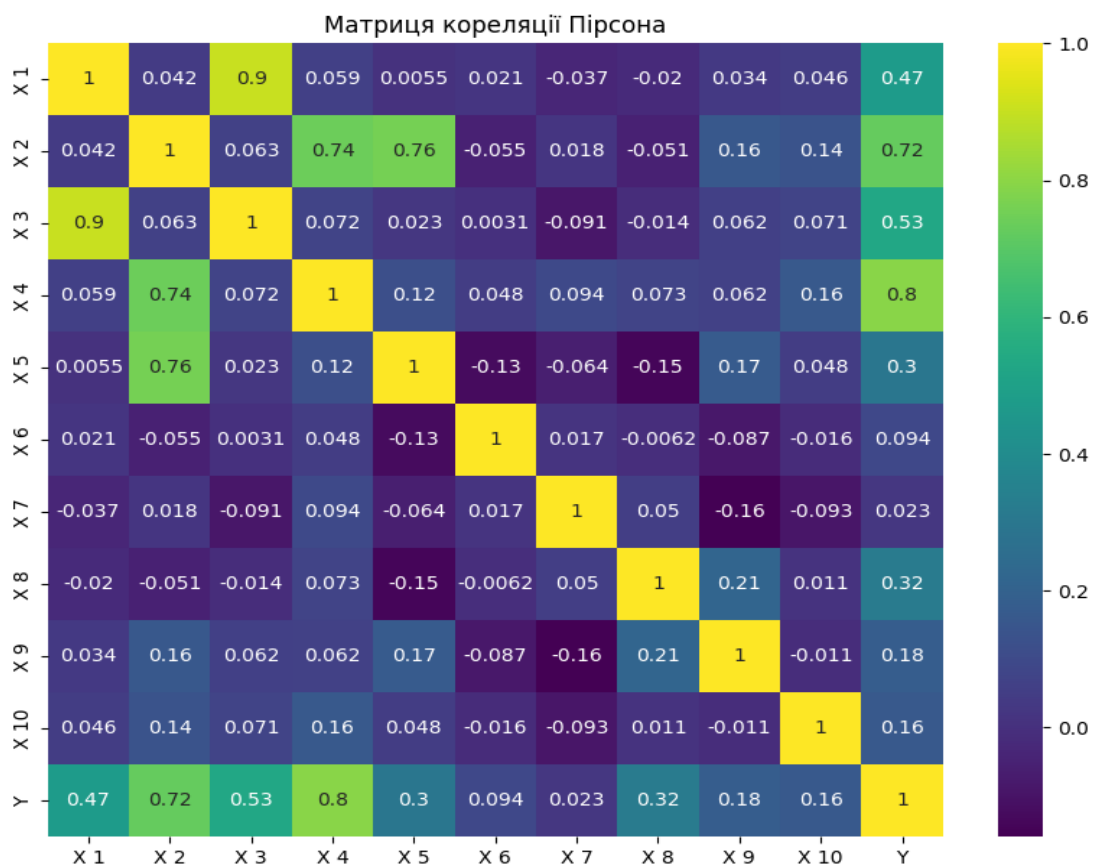
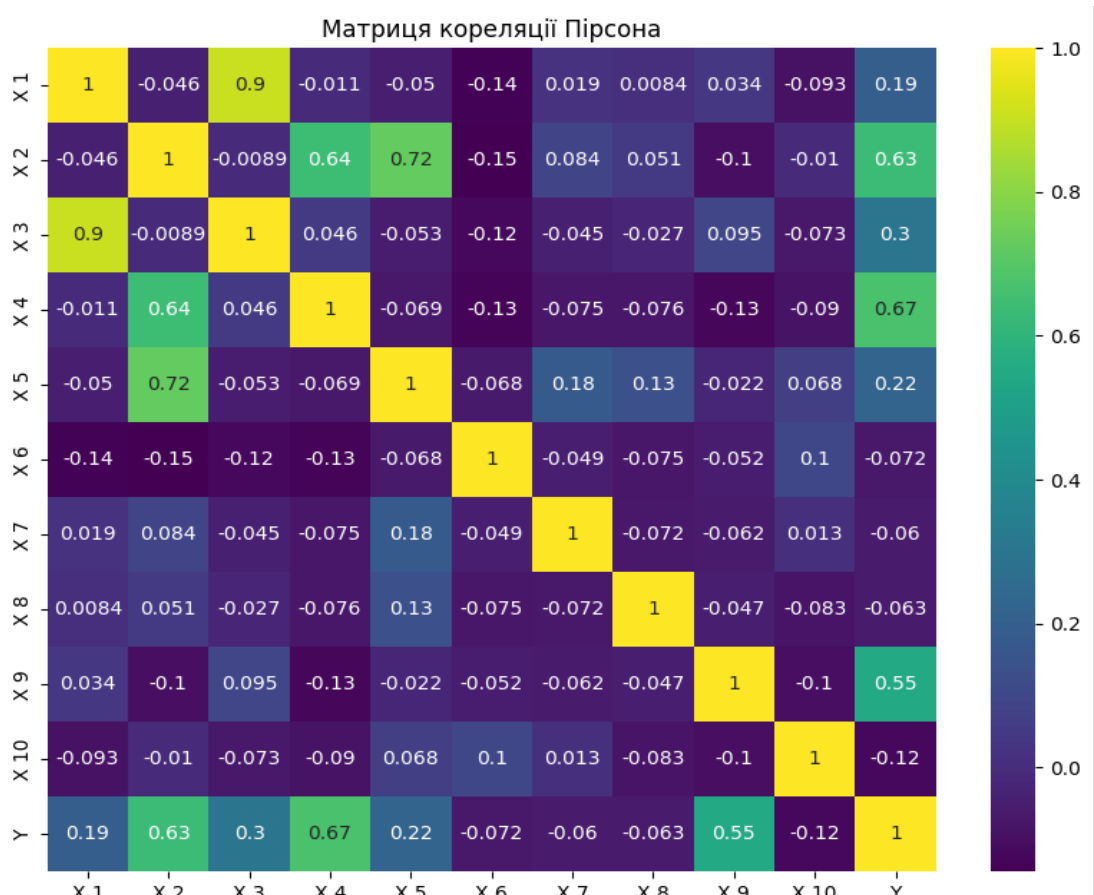
final_features = [feature for feature in high_correlation_features if feature not in features_to_remove]
print(f'Остаточний список ознак без високої кореляції між собою: {final_features}')
MI_X_Ind = df.columns.get_loc(most_important_feature)
# Створимо масив із обраних ознак
selected_features_indices = [df.columns.get_loc(feature) for feature in final_features]
print(f'Індекси обраних ознак: {selected_features_indices}')

```

Найважливіша ознака: X 4 (індекс 3). Ознаки з високою кореляцією з Y: > 0.2 ['X 2', 'X 3', 'X 4', 'X 5', 'X 9']. Пари ознак з високою кореляцією: [('X 1', 'X 3'), ('X 2', 'X 4'), ('X 2', 'X 5')]. Остаточний список ознак без високої кореляції між собою: ['X 3', 'X 4', 'X 9']. Індекси обраних ознак: [2, 3, 8]



Отримуємо матрицю кореляції



Вхідні дані (ознаки) 'X 3', 'X 4', 'X 9' мають значний вплив на вихідні дані (мітки) Y.

4.2. Побудова моделі множинної лінійної регресії

Будуємо модель множинної лінійної регресії на навчальній вибірці відносно всіх обраних за першим пунктом факторів. Виводимо отримані коефіцієнти та оцінки прогнозу. Робимо висновок чи модель має велике зміщення чи дисперсію.

Побудови моделі множинної лінійної регресії відносно обраних ознак – початок. Multiple Linear Regression with selected features:

Коефіцієнти моделі: [[24.19709511 85.40158422 68.99554528]]

Інтерцепт: [13.04892152]

Навчальна вибірка - Mean Squared Error: 1274.470892306941. Навчальна

вибірка - R-squared: 0.9049489233825616. Тестова вибірка - Mean Squared

Error: 1332.106989383001. Тестова вибірка - R-squared: 0.8717689709017278

['X 3', 'X 4', 'X 9']. Рівняння моделі: $[Y=24.1971 \cdot X_3 + 85.4016 \cdot X_4 + 68.9955 \cdot X_9 + 13.0489]$

```

# Побудови моделі множинної лінійної регресії відносно обраних ознак
print("Побудови моделі множинної лінійної регресії відносно обраних ознак - початок")
# Підготовка даних
X_selected = np.array(X[:, selected_features_indices]) # X 1 має індекс 0 ... X 10 - 9
Y = np.array(Y)
# Розділення даних на тренувальні та тестові набори
X_train, X_test, Y_train, Y_test = train_test_split(X_selected, Y, test_size=0.2, random_state=42)

# Створення та навчання моделі лінійної регресії
model = LinearRegression()
model.fit(X_train, Y_train)

# Прогнозування на тренувальних та тестових даних
Y_train_pred = model.predict(X_train)
Y_test_pred = model.predict(X_test)

# Оцінка моделі
mse_train = mean_squared_error(Y_train, Y_train_pred)
r2_train = r2_score(Y_train, Y_train_pred)

mse_test = mean_squared_error(Y_test, Y_test_pred)
r2_test = r2_score(Y_test, Y_test_pred)

print("Multiple Linear Regression with selected features:")

print(f"Коефіцієнти моделі: {model.coef_}")
print(f"Інтерцепт: {model.intercept_}")
print(f'Навчальна вибірка - Mean Squared Error: {mse_train}')
print(f'Навчальна вибірка - R-squared: {r2_train}')
print(f'Тестова вибірка - Mean Squared Error: {mse_test}')
print(f'Тестова вибірка - R-squared: {r2_test}')

# Оцінка зміщення та дисперсії
# Якщо MSE на тестовій вибірці значно вище, ніж на навчальній, це вказує на високу дисперсію (overfitting).
# Якщо R-squared на тестовій вибірці значно нижче, ніж на навчальній, це також вказує на високу дисперсію.
#
# Візуалізація дійсних та передбачених значень на навчальній вибірці
features = final_features
print(features)
plt.figure(figsize=(12, 12))

# if (float(len(features))/2):
#     ax_x = round(int(len(features)/2 - 0.5)+1)
#     ax_y = round(int(len(features)/2 + 0.5)+1)
# else:
#     ax_x = round(int(len(features)/2)+1)
#     ax_y = round(int(len(features)/1)+1)
ax_x = round(int(len(features)/2)+1)
ax_y = round(int(len(features)/2)+1)

for i, feature in enumerate(features):
    plt.subplot(ax_x, ax_y, i+1)
    plt.scatter(X_train[:, i], Y_train, color=c1, label='Дійсні значення (Навчальні)')
    plt.scatter(X_train[:, i], Y_train_pred, color=c2, label='Передбачені значення (Навчальні)')
    plt.xlabel(feature)
    plt.ylabel('Y')
    plt.title(f'{feature} (Навчальні дані)')
    plt.legend()

plt.tight_layout()
plt.show()

# Візуалізація дійсних та передбачених значень на тестовій вибірці
plt.figure(figsize=(12, 12))

```

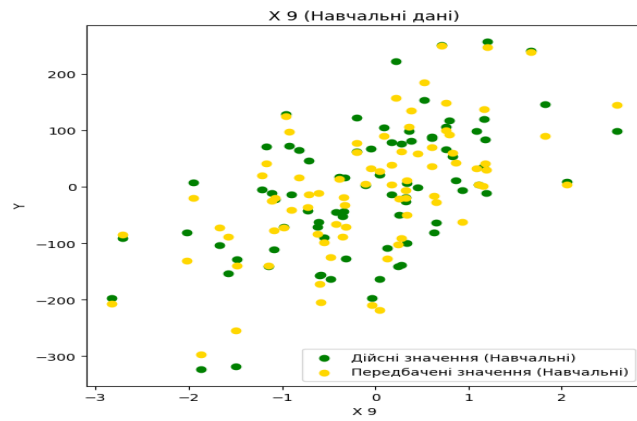
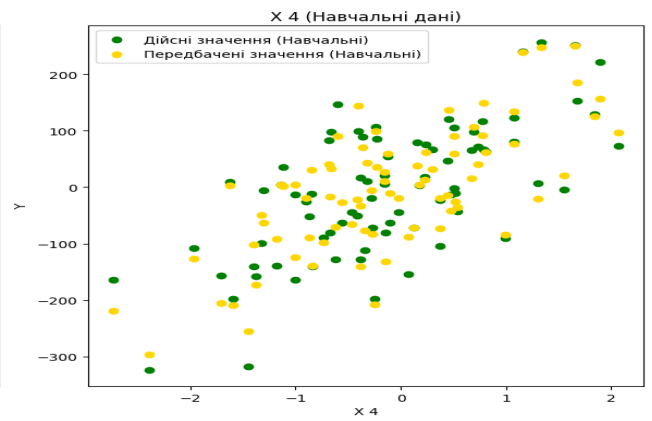
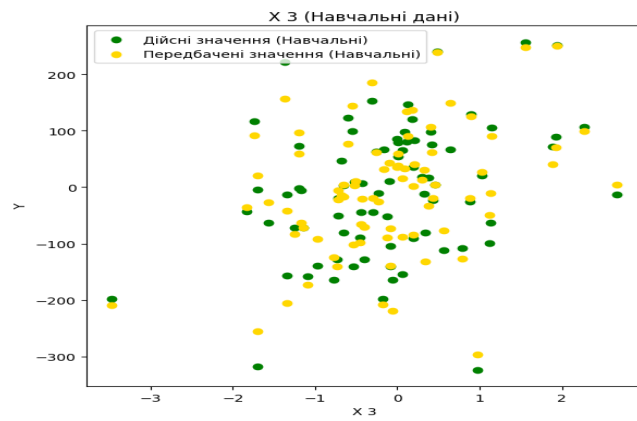
```

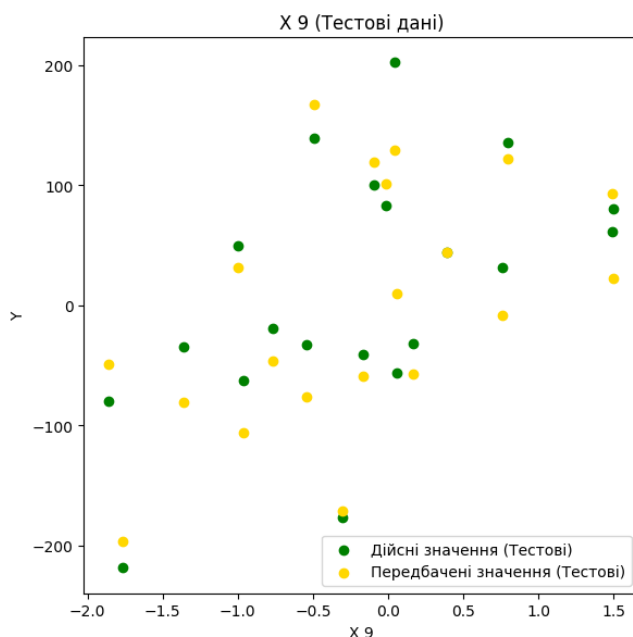
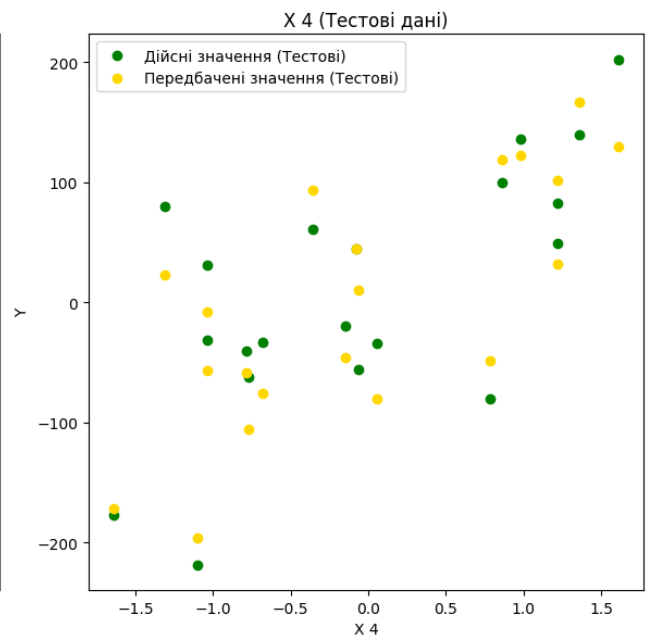
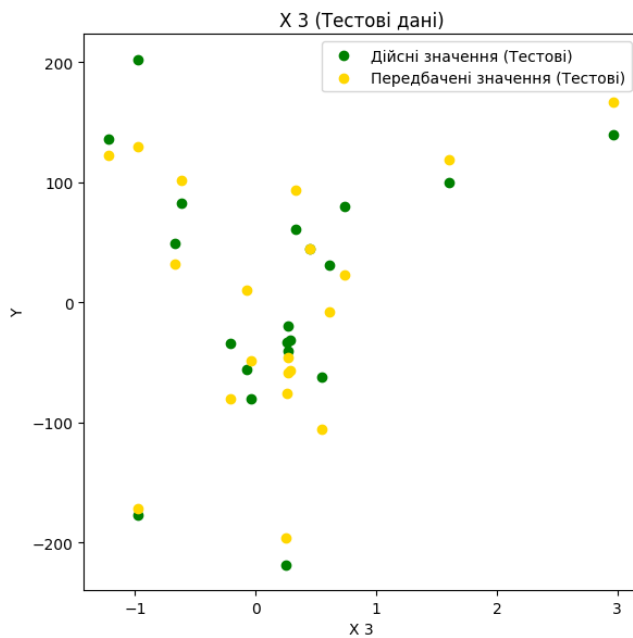
for i, feature in enumerate(features):
    plt.subplot(ax_x, ax_y, i+1)
    plt.scatter(X_test[:, i], Y_test, color=c1, label='Дійсні значення (Тестові)')
    plt.scatter(X_test[:, i], Y_test_pred, color=c2, label='Передбачені значення (Тестові)')
    plt.xlabel(feature)
    plt.ylabel('Y')
    plt.title(f'{feature} (Тестові дані)')
    plt.legend()

plt.tight_layout()
plt.show()

```

Виконуємо візуалізацію дійсного та передбаченого значення на навчальній та тестовій вибірці за кожною ознакою.





Отже, значно менші значення MSE порівняно з однозмінною регресією свідчать про те, що модель значно краще передбачає результати. Невелика різниця між MSE навчальної та тестової вибірок свідчить про те, що модель добре узагальнює і не є перенавченою. Високі значення R^2 означають, що модель пояснює приблизно 90% варіації даних для навчальної вибірки та 87% для тестової вибірки. Це свідчить про високу силу моделі і те, що обрані ознаки є дуже важливими для пояснення варіації залежної змінної. Модель має високу предиктивну силу, що свідчить про те, що обрані ознаки X_3 , X_4 , і X_9 є важливими факторами, які впливають на залежну змінну Y .

Значення R^2 вказують на те, що модель добре передбачає залежну змінну на основі обраних ознак. Невелика різниця між MSE та R^2 для навчальної та тестової вибірок свідчить про гарну узагальнюваність моделі на нові дані, що є ознакою відсутності перенавчання.

Будуємо лінійну модель з регуляризованим параметром за допомогою Ridge або Lasso. Записуємо формулу отриманої моделі з найкращим регуляризованим параметром. Порівнюємо параметри моделі та оцінки прогнозу з попередньою моделлю.

```

# Вибір ознаки
X_feature_1 = np.array(X[:, MI_X_Ind]).reshape(-1, 1)
Y = np.array(Y).reshape(-1, 1)

# Розділення даних на тренувальні та тестові набори
X_train, X_test, Y_train, Y_test = train_test_split(X_feature_1, Y, test_size=0.2, random_state=42)

# Створення та навчання моделей
model_lr = LinearRegression()
model_ridge = Ridge(alpha=1.0)
model_lasso = Lasso(alpha=1.0)

# Навчання моделей
model_lr.fit(X_train, Y_train)
model_ridge.fit(X_train, Y_train)
model_lasso.fit(X_train, Y_train)

# Прогнозування на тренувальних та тестових даних
Y_train_pred_lr = model_lr.predict(X_train)
Y_test_pred_lr = model_lr.predict(X_test)

Y_train_pred_ridge = model_ridge.predict(X_train)
Y_test_pred_ridge = model_ridge.predict(X_test)

Y_train_pred_lasso = model_lasso.predict(X_train)
Y_test_pred_lasso = model_lasso.predict(X_test)

# Оцінка моделей на тестових даних
mse_lr = mean_squared_error(Y_test, Y_test_pred_lr)
r2_lr = r2_score(Y_test, Y_test_pred_lr)

mse_ridge = mean_squared_error(Y_test, Y_test_pred_ridge)
r2_ridge = r2_score(Y_test, Y_test_pred_ridge)

mse_lasso = mean_squared_error(Y_test, Y_test_pred_lasso)
r2_lasso = r2_score(Y_test, Y_test_pred_lasso)
print("Оцінка моделей на тестових даних")
print("Linear Regression:")
print(f"Рівняння моделі: Y = {model_lr.coef_[0][0]:.4f} * X + {model_lr.intercept_[0]:.4f}")
print(f'Mean Squared Error для тестових даних: {mse_lr}')
print(f'R-squared для тестових даних: {r2_lr}\n')

print("Ridge Regression:")
print(f"Рівняння моделі: Y = {model_ridge.coef_[0][0]:.4f} * X + {model_ridge.intercept_[0]:.4f}")
print(f'Mean Squared Error для тестових даних: {mse_ridge}')
print(f'R-squared для тестових даних: {r2_ridge}\n')

print("Lasso Regression:")
print(f"Рівняння моделі: Y = {model_lasso.coef_[0]:.4f} * X + {model_lasso.intercept_[0]:.4f}")
print(f'Mean Squared Error для тестових даних: {mse_lasso}')
print(f'R-squared для тестових даних: {r2_lasso}\n')

# Оцінка моделей на навчальних даних
mse_train_lr = mean_squared_error(Y_train, Y_train_pred_lr)
r2_train_lr = r2_score(Y_train, Y_train_pred_lr)

mse_train_ridge = mean_squared_error(Y_train, Y_train_pred_ridge)
r2_train_ridge = r2_score(Y_train, Y_train_pred_ridge)

mse_train_lasso = mean_squared_error(Y_train, Y_train_pred_lasso)
r2_train_lasso = r2_score(Y_train, Y_train_pred_lasso)

```

```

print("Оцінка моделей на навчальних даних")
print("Linear Regression:")
print(f'Mean Squared Error для навчальних даних: {mse_train_lr}')
print(f'R-squared для навчальних даних: {r2_train_lr}\n')

print("Ridge Regression:")
print(f'Mean Squared Error для навчальних даних: {mse_train_ridge}')
print(f'R-squared для навчальних даних: {r2_train_ridge}\n')

print("Lasso Regression:")
print(f'Mean Squared Error для навчальних даних: {mse_train_lasso}')
print(f'R-squared для навчальних даних: {r2_train_lasso}\n')

# Візуалізація результатів для навчальної вибірки
plt.figure(figsize=(15, 6))

# Linear Regression на навчальних даних
plt.subplot(2, 3, 1)
plt.scatter(X_train, Y_train, color=c1, label='Навчальні дані')
plt.plot(X_train, Y_train_pred_lr, color=c3, linewidth=1, label='Лінійна регресія')
plt.xlabel('X 1')
plt.ylabel('Y')
plt.title('Лінійна регресія (Навчальні дані)')
plt.legend()

# Ridge Regression на навчальних даних
plt.subplot(2, 3, 2)
plt.scatter(X_train, Y_train, color=c1, label='Навчальні дані')
plt.plot(X_train, Y_train_pred_ridge, color=c3, linewidth=1, label='Ridge регресія')
plt.xlabel('X 1')
plt.ylabel('Y')
plt.title('Ridge регресія (Навчальні дані)')
plt.legend()

# Lasso Regression на навчальних даних
plt.subplot(2, 3, 3)
plt.scatter(X_train, Y_train, color=c1, label='Навчальні дані')
plt.plot(X_train, Y_train_pred_lasso, color=c3, linewidth=1, label='Lasso регресія')
plt.xlabel('X 1')
plt.ylabel('Y')
plt.title('Lasso регресія (Навчальні дані)')
plt.legend()

# Візуалізація результатів для тестової вибірки
# Linear Regression на тестових даних
plt.subplot(2, 3, 4)
plt.scatter(X_test, Y_test, color=c2, label='Тестові дані')
plt.plot(X_test, Y_test_pred_lr, color=c3, linewidth=1, label='Лінійна регресія')
plt.xlabel('X 1')
plt.ylabel('Y')
plt.title('Лінійна регресія (Тестові дані)')
plt.legend()

# Ridge Regression на тестових даних
plt.subplot(2, 3, 5)
plt.scatter(X_test, Y_test, color=c2, label='Тестові дані')
plt.plot(X_test, Y_test_pred_ridge, color=c3, linewidth=1, label='Ridge регресія')
plt.xlabel('X 1')
plt.ylabel('Y')
plt.title('Ridge регресія (Тестові дані)')
plt.legend()

```

```
# Lasso Regression на тестових даних
plt.subplot(2, 3, 6)
plt.scatter(X_test, Y_test, color=c2, label='Тестові дані')
plt.plot(X_test, Y_test_pred_lasso, color=c3, linewidth=1, label='Lasso перспекія')
plt.xlabel('X 1')
plt.ylabel('Y')
plt.title('Lasso перспекія (Тестові дані)')
plt.legend()

plt.tight_layout()
plt.show()
print("Побудови лінійної моделі з регуляризацією, скористаємося моделями Ridge (L2 регуляризація) та Lasso (L1 регуляризація) з бібліотеки scikit-learn.
```

Оцінка моделей на тестових даних

Linear Regression:

Рівняння моделі: $Y = 78.0578 * X + 3.0923$

Mean Squared Error для тестових даних: 5819.083383283605

R-squared для тестових даних: 0.43984450453733603

Ridge Regression:

Рівняння моделі: $Y = 77.0904 * X + 2.9739$

Mean Squared Error для тестових даних: 5806.1821122214815

R-squared для тестових даних: 0.4410864042331991

Lasso Regression:

Рівняння моделі: $Y = 77.0539 * X + 2.9694$

Mean Squared Error для тестових даних: 5805.73074017121

R-squared для тестових даних: 0.44112985412346617

Оцінка моделей на навчальних даних

Linear Regression:

Mean Squared Error для навчальних даних: 7338.999795633717

R-squared для навчальних даних: 0.45265142100856925

Ridge Regression:

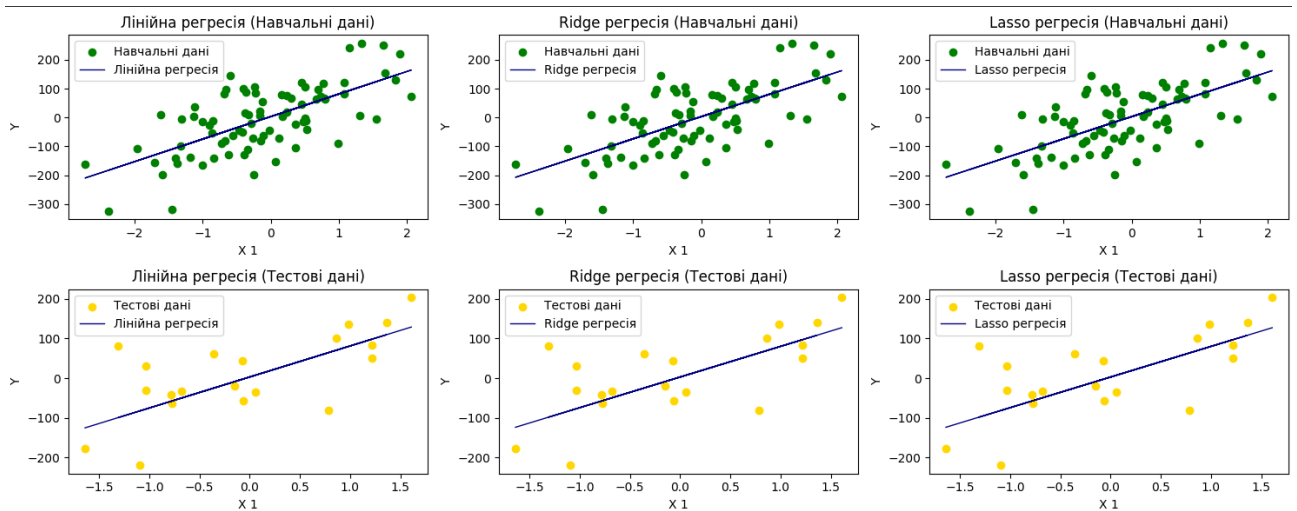
Mean Squared Error для навчальних даних: 7339.932011244722

R-squared для навчальних даних: 0.4525818956094405

Lasso Regression:

Mean Squared Error для навчальних даних: 7340.003707982503

R-squared для навчальних даних: 0.4525765484083728



Ridge Regression та **Lasso Regression** мають дещо покращені значення MSE та R^2 на тестових даних порівняно зі звичайною лінійною регресією, що свідчить про позитивний ефект регуляризації. Моделі з регуляризацією (Ridge і Lasso) мають дуже подібні коефіцієнти, які трохи відрізняються від коефіцієнтів звичайної лінійної регресії, що свідчить про їхню здатність до зменшення перенавчання і покращення загальної здатності до узагальнення. Зважаючи на незначне покращення MSE і R^2 для моделей з регуляризацією, можна рекомендувати використання Lasso Regression для цієї задачі. Lasso Regression також може сприяти вибору більш важливих ознак, якщо кількість ознак збільшиться.

4.3. Побудова моделі множинної поліноміальної регресії

Побудуємо поліноміальну модель. Для цього введемо нові ознаки, що будуть описувати поліном другого ступеня ознак при $\text{degree}=2$:

```

print("Побудова моделі множинної поліноміальної регресії deg2- початок")

# Розділення даних на тренувальні та тестові набори
X_train, X_test, Y_train, Y_test = train_test_split(X_selected, Y, test_size=0.2, random_state=42)

# Створення поліноміальних ознак другого ступеня
poly = PolynomialFeatures(degree=2)
X_train_poly = poly.fit_transform(X_train)
X_test_poly = poly.transform(X_test)

# Створення та навчання моделі лінійної регресії на поліноміальних ознаках
model = LinearRegression()
model.fit(X_train_poly, Y_train)

# Прогнозування на тренувальних та тестових даних
Y_train_pred = model.predict(X_train_poly)
Y_test_pred = model.predict(X_test_poly)

# Оцінка моделі
mse_train = mean_squared_error(Y_train, Y_train_pred)
r2_train = r2_score(Y_train, Y_train_pred)

mse_test = mean_squared_error(Y_test, Y_test_pred)
r2_test = r2_score(Y_test, Y_test_pred)

print("Polynomial Regression with degree 2:")
print(f"Коефіцієнти моделі: {model.coef_}")
print(f"Інтерцепт: {model.intercept_}")
print(f'Навчальна вибірка - Mean Squared Error: {mse_train}')
print(f'Навчальна вибірка - R-squared: {r2_train}')
print(f'Тестова вибірка - Mean Squared Error: {mse_test}')
print(f'Тестова вибірка - R-squared: {r2_test}\n')

print("Побудова моделі множинної поліноміальної регресії deg2- кінець")

```

Побудова моделі множинної поліноміальної регресії deg2- початок

Polynomial Regression with degree 2:

Коефіцієнти моделі: [[0.25.25631427 85.26227848 67.78751485 -0.63119015
1.26009476 0.25169669 2.72340667 -5.54410187 -1.46104264]]

Інтерцепт: [11.76515857]

Навчальна вибірка - Mean Squared Error: 1234.5961335708387

Навчальна вибірка - R-squared: 0.9079228153487144

Тестова вибірка - Mean Squared Error: 1325.0102683317507

Тестова вибірка - R-squared: 0.872452114110853

Побудова моделі множинної поліноміальної регресії deg2- кінець

Рівняння моделі: $[Y=25.2563 \cdot X_3 + 85.2623 \cdot X_4 + 67.7875 \cdot X_9 - 0.6312 \cdot X_{32}$
 $+ 1.2601 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0.2517 \cdot X_3 \cdot X_9 + 2.7234 \cdot X_4^2 - 5.5441 \cdot X_4 \cdot X_9 - 1.4610 \cdot X_{92}$
 $+ 11.7652]$

Спробуємо внести зміни, введемо нові ознаки, що будуть описувати попарно куби ознак, тобто $\text{degree}=3$:

```
#Для цього введемо нові ознаки, що будуть описувати попарно куби ознак, тобто degree=3:
print("Побудова моделі множинної поліноміальної регресії deg3- початок")

# Розділення даних на тренувальні та тестові набори
X_train, X_test, Y_train, Y_test = train_test_split(X_selected, Y, test_size=0.2, random_state=42)

# Створення поліноміальних ознак третього ступеня
poly = PolynomialFeatures(degree=3)
X_train_poly = poly.fit_transform(X_train)
X_test_poly = poly.transform(X_test)

# Створення та навчання моделі лінійної регресії на поліноміальних ознаках
model = LinearRegression()
model.fit(X_train_poly, Y_train)

# Прогнозування на тренувальних та тестових даних
Y_train_pred = model.predict(X_train_poly)
Y_test_pred = model.predict(X_test_poly)

# Оцінка моделі
mse_train = mean_squared_error(Y_train, Y_train_pred)
r2_train = r2_score(Y_train, Y_train_pred)

mse_test = mean_squared_error(Y_test, Y_test_pred)
r2_test = r2_score(Y_test, Y_test_pred)

print("Polynomial Regression with degree 3:")
print(f"Коефіцієнти моделі: {model.coef_}")
print(f"Інтерцепт: {model.intercept_}")
print(f'Навчальна вибірка - Mean Squared Error: {mse_train}')
print(f'Навчальна вибірка - R-squared: {r2_train}')
print(f'Тестова вибірка - Mean Squared Error: {mse_test}')
print(f'Тестова вибірка - R-squared: {r2_test}\n')

print("Побудова моделі множинної поліноміальної регресії deg3- кінець")
```

Побудова моделі множинної поліноміальної регресії deg3- початок
Polynomial Regression with degree 3:

Коефіцієнти моделі: [[0.00000000e+00 1.83264876e+01 9.56272607e+01
6.04979448e+01 5.40150229e-01 -7.99615532e-01 7.92360334e+00
3.28581854e-01 -1.01188310e+01 1.36943036e+00 -4.32338508e-02
2.68378346e+00 5.89854837e+00 -4.08044272e+00 -7.05146375e+00
1.50613251e+01 -4.12207307e+00 2.23241000e+00 -4.49711732e+00
1.21372340e+00]]

Інтерцепт: [9.22718307]

Навчальна вибірка - Mean Squared Error: 1063.0695251480934

Навчальна вибірка - R-squared: 0.9207154094342552

Тестова вибірка - Mean Squared Error: 1241.599161402442

Тестова вибірка - R-squared: 0.8804814181870408

Побудова моделі множинної поліноміальної регресії deg3- кінець

Модель із ступенем 2 має хороші показники на навчальних даних (MSE: 1234.5961, R^2 : 0.9079) і тестових даних (MSE: 1325.0103, R^2 : 0.8725). Це свідчить про здатність моделі добре пояснювати варіацію даних і передбачати результати на нових даних. Модель із ступенем 3 має кращі показники на навчальних даних (MSE: 1063.0695, R^2 : 0.9207) порівняно з моделлю ступеня 2. На тестових даних також покращені показники (MSE: 1241.5992, R^2 : 0.8805), що свідчить про те, що ця модель краще справляється з передбаченням. Модель другого ступеня краще пояснює дані та має трохи нижчі показники помилки порівняно з простою лінійною регресією. Модель третього ступеня ще краще пояснює варіацію даних і має нижчі показники помилки, що свідчить про те, що додаткові поліноміальні терміни покращують якість передбачень.

Регресійна ANN модель

Створюємо мережу з одним прихованими шаром та одним нейроном (по суті це лінійна регресія). Навчаємо модель та записуємо отримане рівняння моделі.

```

# Регресійна ANN модель

# Розділення даних на тренувальні та тестові набори
X_train, X_test, Y_train, Y_test = train_test_split(X_selected, Y, test_size=0.2, random_state=42)

# Масштабування ознак
scaler = StandardScaler()
X_train_scaled = scaler.fit_transform(X_train)
X_test_scaled = scaler.transform(X_test)

# Створення моделі ANN
model = Sequential([
    Input(shape=(X_train_scaled.shape[1],)), # Визначення форми вхідних даних
    Dense(1) # Один нейрон в прихованому шарі
])

# Компіляція моделі
model.compile(optimizer='adam', loss='mean_squared_error')

# Навчання моделі
history = model.fit(X_train_scaled, Y_train, epochs=5000, validation_data=(X_test_scaled, Y_test), verbose=0)

# Прогнозування на тренувальних та тестових даних
Y_train_pred = model.predict(X_train_scaled)
Y_test_pred = model.predict(X_test_scaled)

# Оцінка моделі
mse_train = mean_squared_error(Y_train, Y_train_pred)
r2_train = r2_score(Y_train, Y_train_pred)

mse_test = mean_squared_error(Y_test, Y_test_pred)
r2_test = r2_score(Y_test, Y_test_pred)

# Отримання коефіцієнтів моделі
weights, bias = model.layers[0].get_weights()

print(f"Рівняння моделі: Y = ", end="")
for weight, feature in zip(weights.flatten(), high_correlation_features):
    print(f"{weight:.4f} * {feature} + ", end="")
print(f"{bias[0]:.4f}")
print(f'Trained Weights: {weights.flatten()}')
print(f'Trained Bias: {bias[0]}')
print(f'Навчальна вибірка - Mean Squared Error: {mse_train}')
print(f'Навчальна вибірка - R-squared: {r2_train}')
print(f'Тестова вибірка - Mean Squared Error: {mse_test}')
print(f'Тестова вибірка - R-squared: {r2_test}')

# Візуалізація кривої навчання
plt.figure(figsize=(12, 6))

plt.plot(history.history['loss'], label='Втрата на тренувальних даних')
plt.plot(history.history['val_loss'], label='Втрата на валідаційних даних')
plt.xlabel('Епохи')
plt.ylabel('Втрата')
plt.title('Крива навчання')
plt.legend()
plt.show()

# Візуалізація дійсних та передбачених значень на навчальній вибірці
plt.figure(figsize=(12, 6))

```

```
plt.subplot(1, 2, 1)
plt.scatter(Y_train, Y_train_pred, color=c1, label='Передбачені значення (Навчальні)')
plt.plot([min(Y_train), max(Y_train)], [min(Y_train), max(Y_train)], color=c2, linestyle='--')
plt.xlabel('Дійсні значення')
plt.ylabel('Передбачені значення')
plt.title('Навчальні дані: дійсні vs передбачені значення')
plt.legend()

# Візуалізація дійсних та передбачених значень на тестовій вибірці
plt.subplot(1, 2, 2)
plt.scatter(Y_test, Y_test_pred, color=c1, label='Передбачені значення (Тестові)')
plt.plot([min(Y_test), max(Y_test)], [min(Y_test), max(Y_test)], color=c2, linestyle='--')
plt.xlabel('Дійсні значення')
plt.ylabel('Передбачені значення')
plt.title('Тестові дані: дійсні vs передбачені значення')
plt.legend()

plt.tight_layout()
plt.show()
```

3/3 ————— 0s 8ms/step

1/1 ————— 0s 19ms/step

Рівняння моделі: $Y = 11.5222 * X^2 + 14.4980 * X^3 + 14.0014 * X^4 + -3.5245$

Trained Weights: [11.52218 14.4979925 14.0013895]

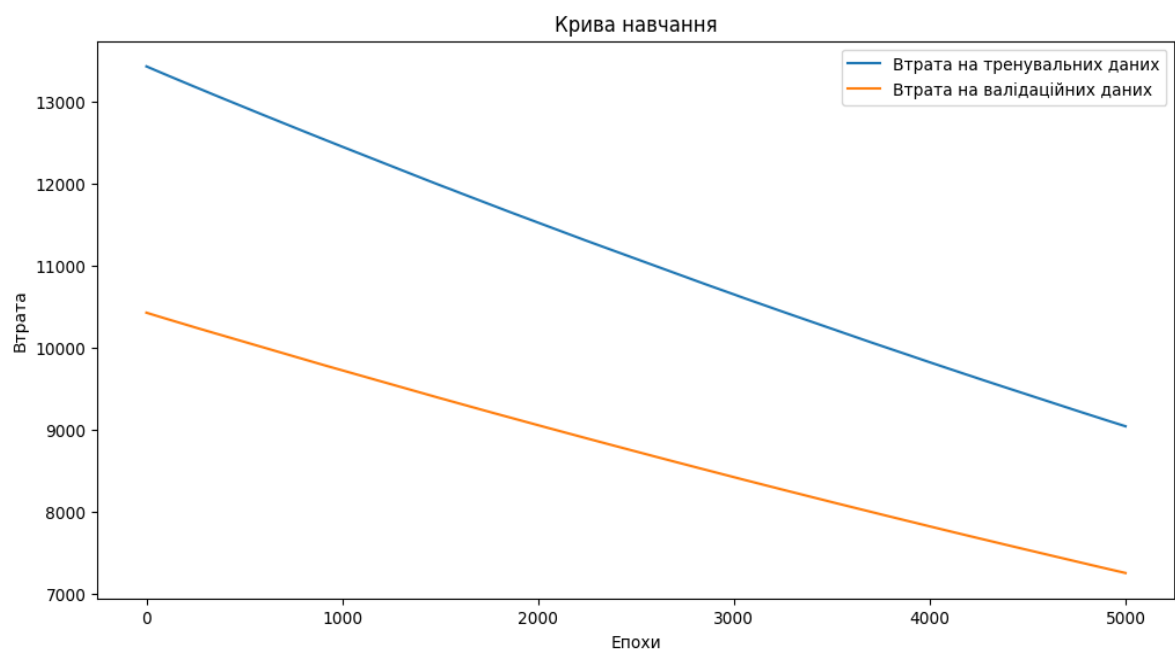
Trained Bias: -3.524505138397217

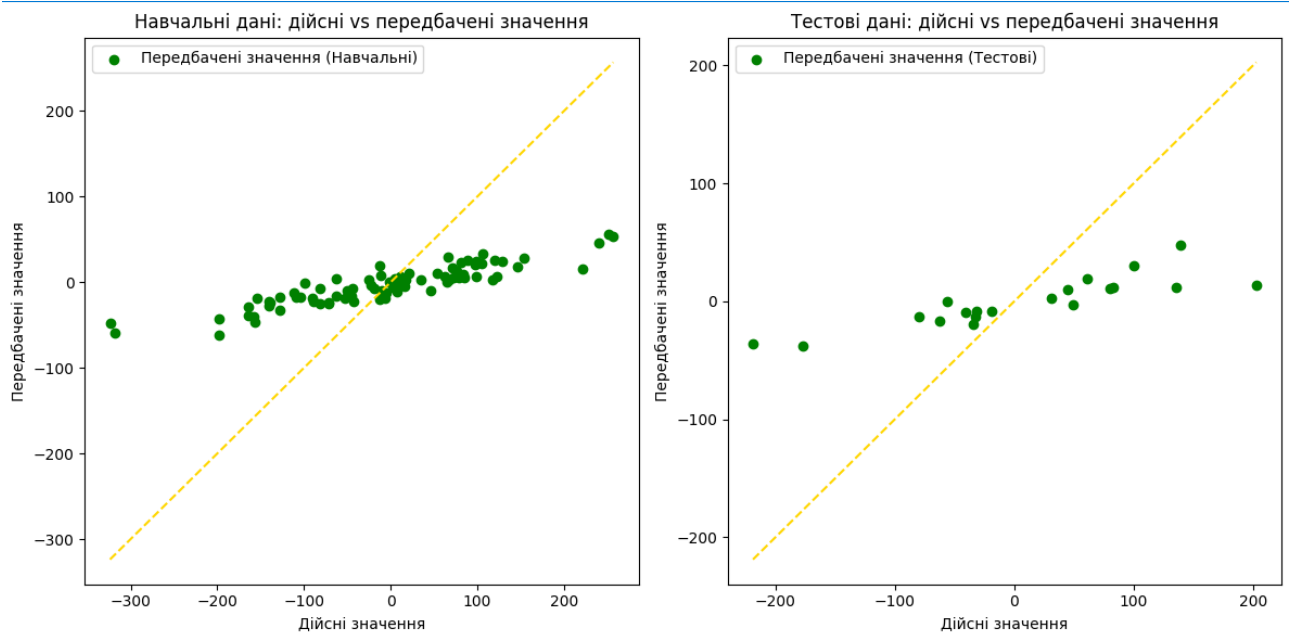
Навчальна вибірка - Mean Squared Error: 9043.963606793886

Навчальна вибірка - R-squared: 0.3254938320649725

Тестова вибірка - Mean Squared Error: 7255.982534887575

Тестова вибірка - R-squared: 0.3015259922938459





Створюємо NN з двома прихованими шарами та багатьма нейронами з нелінійною функцією активації. Навчаємо модель та оцінюємо результат.

```

print("Пересічна ANN модель з шари - збільшена кількість нейронів- оптимізація епох - початок")

# Розділення даних на тренувальні та тестові набори
X_train, X_test, Y_train, Y_test = train_test_split(X_selected, Y, test_size=0.2, random_state=42)

# Масштабування ознак
scaler = StandardScaler()
X_train_scaled = scaler.fit_transform(X_train)
X_test_scaled = scaler.transform(X_test)

# Створення моделі ANN з двома прихованими шарами та багатьма нейронами
model = Sequential([
    Dense(1024, activation='relu', kernel_regularizer=l2(0.001)), # Другий прихований шар з 1024 нейронами
    Dropout(0.1), # Dropout для регуляризації
    Dense(512, activation='relu', kernel_regularizer=l2(0.001)), # Другий прихований шар з 512 нейронами
    Dropout(0.1), # Dropout для регуляризації
    Dense(256, activation='relu', kernel_regularizer=l2(0.001)), # Другий прихований шар з 256 нейронами
    Dropout(0.1), # Dropout для регуляризації
    Dense(1) # Вихідний шар
])

# Компіляція моделі
model.compile(optimizer='adam', loss='mean_squared_error')

# Навчання моделі
history = model.fit(X_train_scaled, Y_train, epochs=50, batch_size=10, validation_data=(X_test_scaled, Y_test), verbose=0)

# Прогнозування на тренувальних та тестових даних
Y_train_pred = model.predict(X_train_scaled)
Y_test_pred = model.predict(X_test_scaled)

# Оцінка моделі
mse_train = mean_squared_error(Y_train, Y_train_pred)
r2_train = r2_score(Y_train, Y_train_pred)

mse_test = mean_squared_error(Y_test, Y_test_pred)
r2_test = r2_score(Y_test, Y_test_pred)

# Отримання коефіцієнтів моделі
weights, bias = model.layers[0].get_weights()

print(f'Trained Weights: {weights.flatten()}')
print(f'Trained Bias: {bias[0]}')

print(f'Навчальна вибірка - Mean Squared Error: {mse_train}')
print(f'Навчальна вибірка - R-squared: {r2_train}')
print(f'Тестова вибірка - Mean Squared Error: {mse_test}')
print(f'Тестова вибірка - R-squared: {r2_test}')

# Візуалізація кривої навчання
plt.figure(figsize=(12, 6))

plt.plot(history.history['loss'], label='Втрата на тренувальних даних')
plt.plot(history.history['val_loss'], label='Втрата на валідаційних даних')
plt.xlabel('Епохи')
plt.ylabel('Втрата')
plt.title('Крива навчання')
plt.legend()
plt.show()

# Візуалізація дійсних та передбачених значень на навчальній вибірці
plt.figure(figsize=(12, 6))

```

```
plt.subplot(1, 2, 1)
plt.scatter(Y_train, Y_train_pred, color=c1, label='Передбачені значення (Навчальні)')
plt.plot([min(Y_train), max(Y_train)], [min(Y_train), max(Y_train)], color=c2, linestyle='--')
plt.xlabel('Дійсні значення')
plt.ylabel('Передбачені значення')
plt.title('Навчальні дані: дійсні vs передбачені значення')
plt.legend()

# Візуалізація дійсних та передбачених значень на тестовій вибірці
plt.subplot(1, 2, 2)
plt.scatter(Y_test, Y_test_pred, color=c1, label='Передбачені значення (Тестові)')
plt.plot([min(Y_test), max(Y_test)], [min(Y_test), max(Y_test)], color=c2, linestyle='--')
plt.xlabel('Дійсні значення')
plt.ylabel('Передбачені значення')
plt.title('Тестові дані: дійсні vs передбачені значення')
plt.legend()

plt.tight_layout()
plt.show()

print("Регресійна ANN модель 3 шари - збільшена кількість нейронів - оптимізація епох - кінець")
```

Регресійна ANN модель 3 шари - збільшена кількість нейронів-
оптимізація епох - початок

3/3 ————— 0s 18ms/step

1/1 ————— 0s 19ms/step

Trained Weights: [-0.00120204 0.12545104 0.03687984 ... -0.08256637

0.08794417 -0.04052598]

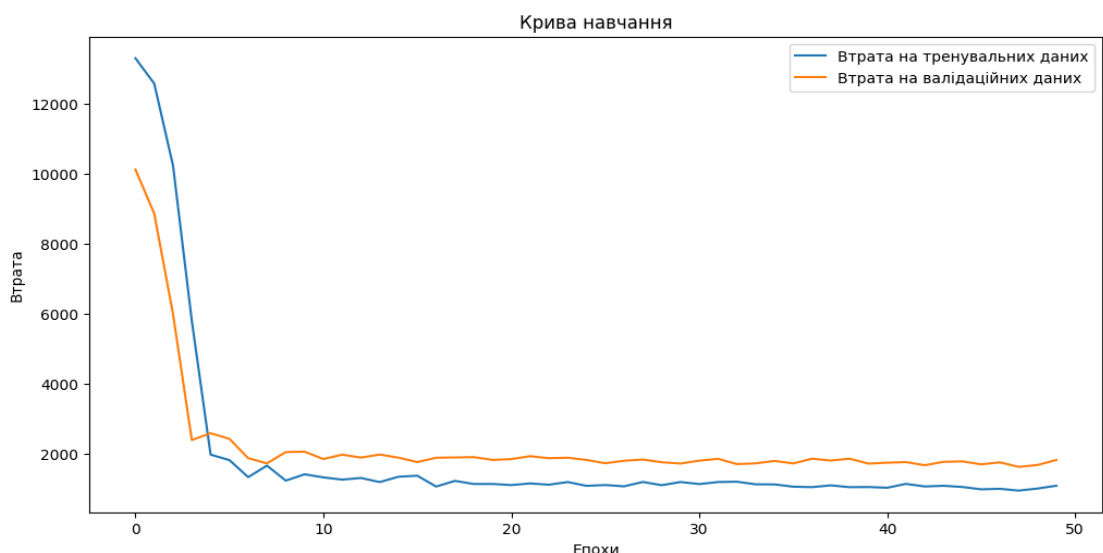
Trained Bias: 0.03618336468935013

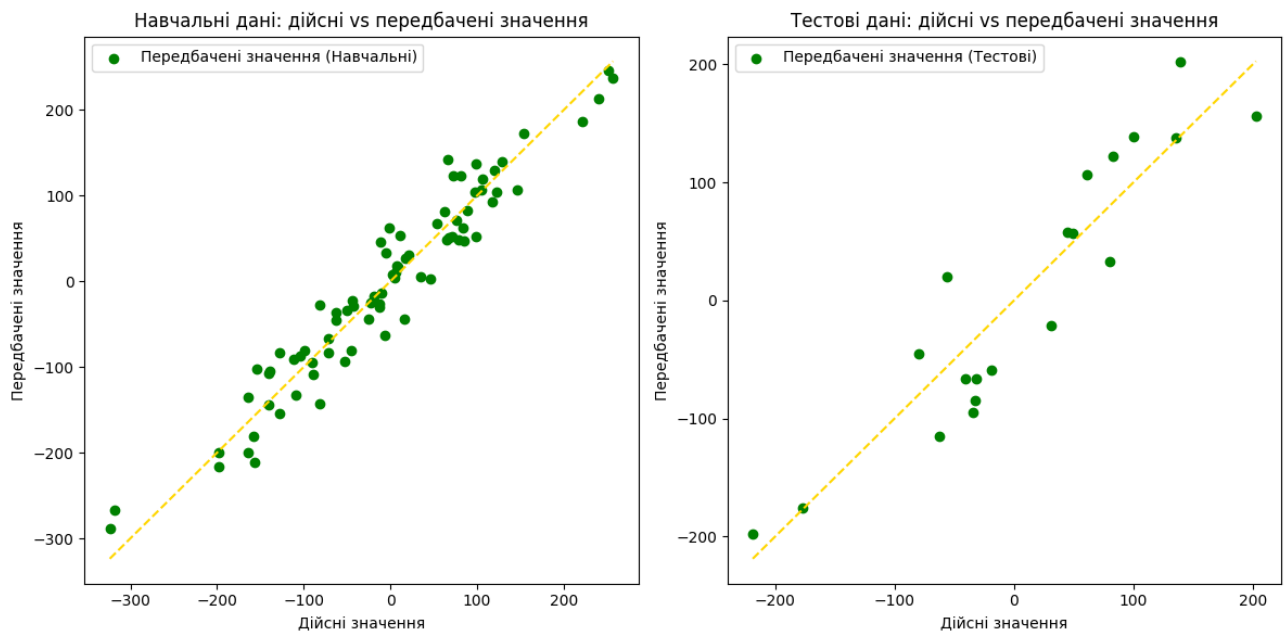
Навчальна вибірка - Mean Squared Error: 956.0547102877083

Навчальна вибірка - R-squared: 0.9286966614407903

Тестова вибірка - Mean Squared Error: 1828.9654537842366

Тестова вибірка - R-squared: 0.8239404761080267





Низьке значення MSE (956.0547) та високе значення R^2 (0.9287) вказують на те, що модель добре пояснює варіацію залежної змінної та має високу точність передбачень на навчальних даних. Значення MSE (1828.9655) є вищим, а R^2 (0.8239) дещо нижчим порівняно з навчальними даними. Це свідчить про певне зниження точності на тестових даних, але модель все ще залишається досить точною. Використання L2-регуляризації допомагає запобігти перенавчанню, що особливо важливо при збільшенні кількості нейронів у моделі. Модель ANN з трьома шарами і збільшеною кількістю нейронів добре підходить для цієї задачі регресії, демонструючи високу здатність до узагальнення та точних передбачень. Результати показують, що використання активації ReLU та L2-регуляризації є ефективним підходом для побудови нейронних мереж з високою точністю.

Аналіз результатів

За допомогою алгоритму PCA оцінюємо, скільки варіативності можна пояснити за рахунок різної кількості головних компонент.

```
print("Аналіз результатів - початок")
X = df.drop('Y',axis=1)
Y = df['Y']
# Розділення даних на тренувальні та тестові набори
X_train, X_test, Y_train, Y_test = train_test_split(X, Y, test_size=0.2, random_state=42)

pca = PCA()
X_train_pca = pca.fit_transform(X_train)
X_test_pca = pca.transform(X_test)
print("Точність % при наявності певної кількості перетворених ознак 1-10:")
var = np.cumsum(pca.explained_variance_ratio_)
print(np.cumsum(np.round(pca.explained_variance_ratio_, decimals=4)*100))
print(len(np.cumsum(np.round(pca.explained_variance_ratio_, decimals=4)*100)))

# Визначення мінімальної кількості ознак для досягнення точності більше 85%
thresh85 = 0.85
num_features_for_threshold85 = np.argmax(var >= thresh85) + 1

print(f'Мінімальна кількість ознак для точності більше 85%: {num_features_for_threshold85}')

thresh95 = 0.95
num_features_for_threshold95 = np.argmax(var >= thresh95) + 1

print(f'Мінімальна кількість ознак для точності більше 95%: {num_features_for_threshold95}')
```

Аналіз результатів - початок

Точність у % при наявності певної кількості перетворених ознак 1-10:

[29.11 48.7 60.75 70.1 79.21 86.6 93.61 99.1 100.01 100.01]

Мінімальна кількість ознак для точності більше 85%: 6

Мінімальна кількість ознак для точності більше 95%: 8

Будуємо модель множинної регресії на головних компонентах (з точністю >85%):

```

print("Аналіз результатів - >85% - початок")
# Використання головних компонент
X_train_reduced85 = X_train_pca[:, :num_features_for_threshold85]
X_test_reduced85 = X_test_pca[:, :num_features_for_threshold85]

# Створення та навчання моделі лінійної регресії
regression_model = LinearRegression()
regression_model.fit(X_train_reduced85, Y_train)

# Прогнозування на тренувальних та тестових даних
Y_train_pred = regression_model.predict(X_train_reduced85)
Y_test_pred = regression_model.predict(X_test_reduced85)

# Оцінка моделі
mse_train = mean_squared_error(Y_train, Y_train_pred)
r2_train = r2_score(Y_train, Y_train_pred)

mse_test = mean_squared_error(Y_test, Y_test_pred)
r2_test = r2_score(Y_test, Y_test_pred)

# Вивід точності у відсотках
train_accuracy = r2_train
test_accuracy = r2_test

print(f'Навчальна вибірка - Середньоквадратична помилка: {mse_train}')
print(f'Навчальна вибірка - R-квадрат: {r2_train}')
print(f'Навчальна вибірка - Точність: {train_accuracy:.2f}')
print(f'Тестова вибірка - Середньоквадратична помилка: {mse_test}')
print(f'Тестова вибірка - R-квадрат: {r2_test}')
print(f'Тестова вибірка - Точність: {test_accuracy:.2f}')

# Візуалізація дійсних та передбачених значень на навчальній вибірці
plt.figure(figsize=(12, 6))

plt.subplot(1, 2, 1)
plt.scatter(Y_train, Y_train_pred, color=c1, label='Передбачені значення (Навчальні)')
plt.plot([min(Y_train), max(Y_train)], [min(Y_train), max(Y_train)], color=c2, linestyle='--')
plt.xlabel('Дійсні значення')
plt.ylabel('Передбачені значення')
plt.title('Навчальні дані: дійсні vs передбачені значення')
plt.legend()

# Візуалізація дійсних та передбачених значень на тестовій вибірці
plt.subplot(1, 2, 2)
plt.scatter(Y_test, Y_test_pred, color=c1, label='Передбачені значення (Тестові)')
plt.plot([min(Y_test), max(Y_test)], [min(Y_test), max(Y_test)], color=c2, linestyle='--')
plt.xlabel('Дійсні значення')
plt.ylabel('Передбачені значення')
plt.title('Тестові дані: дійсні vs передбачені значення')
plt.legend()

plt.tight_layout()
plt.show()
print("Аналіз результатів - >85% - кінець")

```

Аналіз результатів - >85% - початок

Навчальна вибірка - Середньоквадратична помилка: 2278.6205459573916

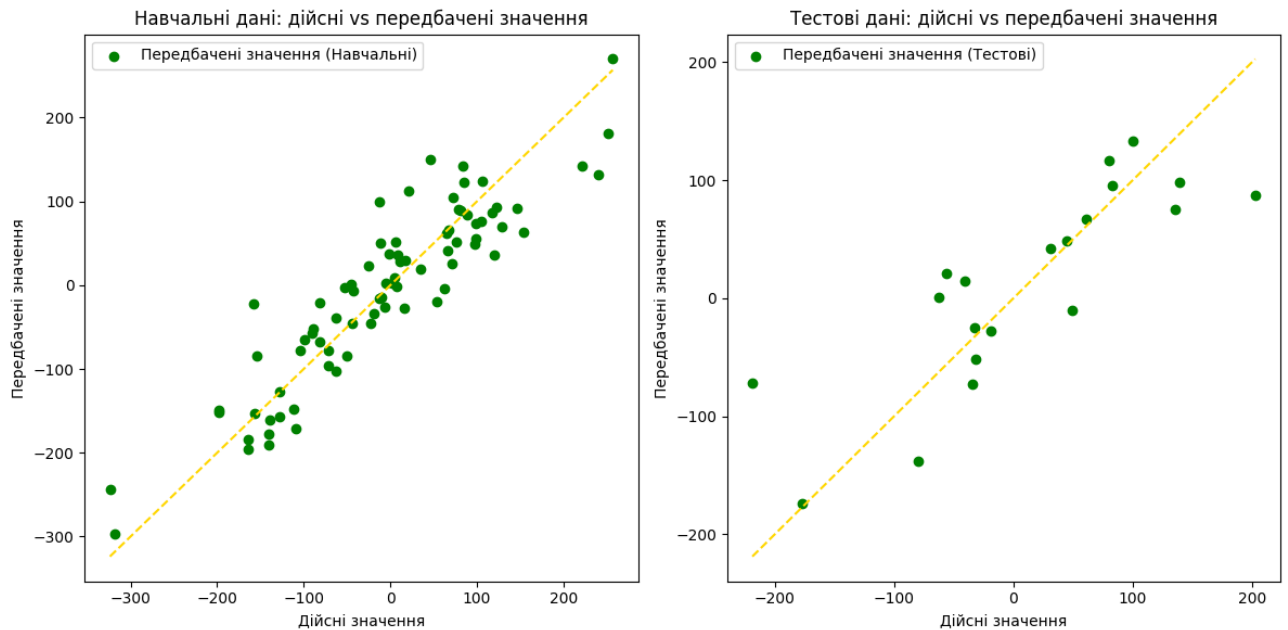
Навчальна вибірка - R-квадрат: 0.8300586247961924

Навчальна вибірка - Точність: 0.83

Тестова вибірка - Середньоквадратична помилка: 3240.836022091366

Тестова вибірка - R-квадрат: 0.6880312605791437

Тестова вибірка - Точність: 0.69



Якість моделі на навчальних даних. Модель, побудована після застосування PCA, показує досить високі значення R^2 (0.8301) і точність (0.83) на навчальних даних. Це вказує на те, що модель добре пояснює варіацію даних і забезпечує високу точність передбачень на навчальних даних. Значення MSE (2278.6205) є порівняно невисоким, що свідчить про те, що модель досить точно передбачає значення цільової змінної на навчальних даних.

Якість моделі на тестових даних. Значення R^2 (0.6880) і точність (0.69) на тестових даних є нижчими порівняно з навчальними даними. Це вказує на те, що модель втрачає частину своєї здатності до узагальнення на нових даних. Значення MSE (3240.8360) на тестових даних є вищим, що свідчить про меншу точність передбачень на нових даних. Модель з PCA може бути корисною в ситуаціях, коли важливо зменшити розмірність даних для спрощення моделі і зменшення обчислювальної складності. Для підвищення точності передбачень можна розглянути застосування інших

методів зменшення розмірності або налаштування моделі після застосування PCA.

Будуємо модель множинної регресії на головних компонентах (з точністю >95%):

```
# Використання головних компонент
X_train_reduced95 = X_train_pca[:, :num_features_for_threshold95]
X_test_reduced95 = X_test_pca[:, :num_features_for_threshold95]

# Створення та навчання моделі лінійної регресії
regression_model = LinearRegression()
regression_model.fit(X_train_reduced95, Y_train)

# Прогнозування на тренувальних та тестових даних
Y_train_pred = regression_model.predict(X_train_reduced95)
Y_test_pred = regression_model.predict(X_test_reduced95)

# Оцінка моделі
mse_train = mean_squared_error(Y_train, Y_train_pred)
r2_train = r2_score(Y_train, Y_train_pred)

mse_test = mean_squared_error(Y_test, Y_test_pred)
r2_test = r2_score(Y_test, Y_test_pred)

# Вивід точності у відсотках
train_accuracy = r2_train
test_accuracy = r2_test

print(f'Навчальна вибірка - Середньоквадратична помилка: {mse_train}')
print(f'Навчальна вибірка - R-квадрат: {r2_train}')
print(f'Навчальна вибірка - Точність: {train_accuracy:.2f}')
print(f'Тестова вибірка - Середньоквадратична помилка: {mse_test}')
print(f'Тестова вибірка - R-квадрат: {r2_test}')
print(f'Тестова вибірка - Точність: {test_accuracy:.2f}')

# Візуалізація дійсних та передбачених значень на навчальній вибірці
plt.figure(figsize=(12, 6))

plt.subplot(1, 2, 1)
plt.scatter(Y_train, Y_train_pred, color=c1, label='Передбачені значення (Навчальні)')
plt.plot([min(Y_train), max(Y_train)], [min(Y_train), max(Y_train)], color=c2, linestyle='--')
plt.xlabel('Дійсні значення')
plt.ylabel('Передбачені значення')
plt.title('Навчальні дані: дійсні vs передбачені значення')
plt.legend()

# Візуалізація дійсних та передбачених значень на тестовій вибірці
plt.subplot(1, 2, 2)
plt.scatter(Y_test, Y_test_pred, color=c1, label='Передбачені значення (Тестові)')
plt.plot([min(Y_test), max(Y_test)], [min(Y_test), max(Y_test)], color=c2, linestyle='--')
plt.xlabel('Дійсні значення')
plt.ylabel('Передбачені значення')
plt.title('Тестові дані: дійсні vs передбачені значення')
plt.legend()

plt.tight_layout()
plt.show()
```

Навчальна вибірка - Середньоквадратична помилка: 14.759861641451517

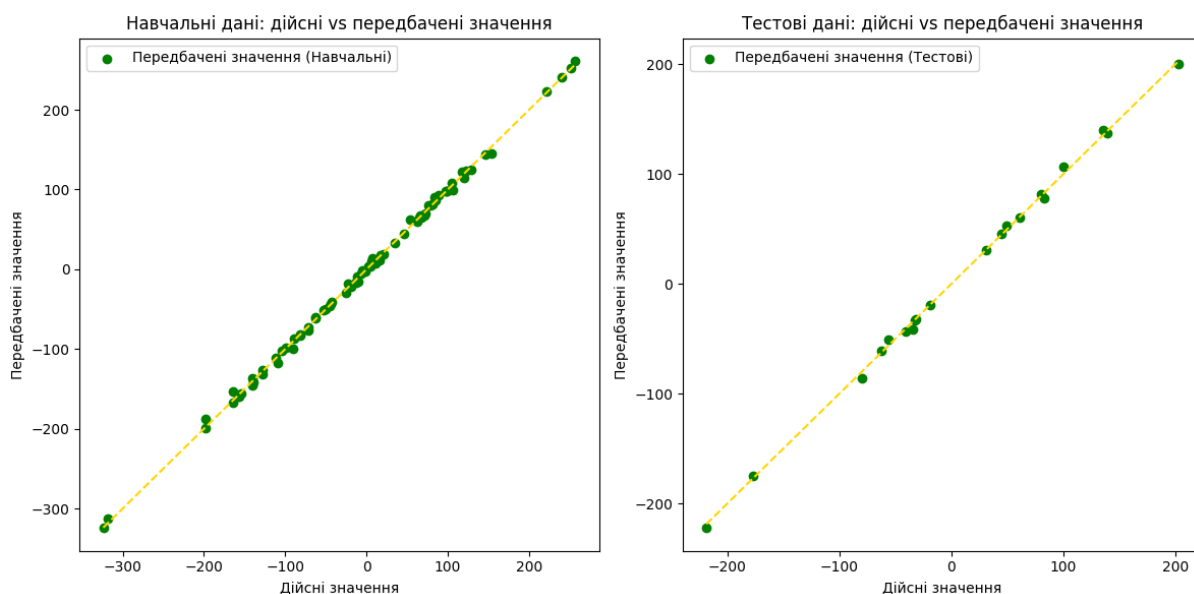
Навчальна вибірка - R-квадрат: 0.9988991975036755

Навчальна вибірка - Точність: 1.00

Тестова вибірка - Середньоквадратична помилка: 12.225460008978953

Тестова вибірка - R-квадрат: 0.998823155098918

Тестова вибірка - Точність: 1.00



Якість моделі на навчальних даних. Модель, побудована після застосування PCA для збереження >95% варіації даних, показує надзвичайно високі значення R^2 (0.9989) і точність (1.00) на навчальних даних. Це вказує на те, що модель майже ідеально пояснює варіацію даних і забезпечує високу точність передбачень на навчальних даних. Значення MSE (14.7599) є дуже низьким, що свідчить про високу точність передбачень на навчальних даних.

Якість моделі на тестових даних. Значення R^2 (0.9988) і точність (1.00) на тестових даних також є надзвичайно високими. Це вказує на те, що модель зберігає свою здатність до узагальнення і передбачає з високою точністю навіть на нових даних. Значення MSE (12.2255) на тестових даних є дуже низьким, що свідчить про високу точність передбачень на нових даних. Застосування PCA для збереження >95% варіації даних дозволило зменшити розмірність даних, зберігаючи при цьому майже всю важливу

інформацію. Така висока точність на тестових даних свідчить про те, що збереження >95% варіації даних забезпечує достатню кількість інформації для точних передбачень.

Таблиця 4.1 – Результати побудови моделей регресії

Ім'я моделі	Формула моделі	Навчальна вибірка		Тестова вибірка	
		MSE	R2	MSE	R2
Mdl Лінійна Один фактор	$Y = 78.0578 * X_4 + 3.0923$	7338	0.44	5819	0.4398
Mdl Лінійна Всі фактори	$Y = 64.801 + 55.506 * X_1 + 79.559 * X_2 + 35.518 * X_3$	1274	0.9049	1332	0.8717
Mdl_Poly Поліноміальна		1063	0.9207	1241	0.88
Mdl_nn Нейронна мережа		956	0.9287	1828	0.8239
Mdl_pca Лінійна модель на основі головних компонент		15	0.9989	12	0.9989

Висновки

Лінійна регресія: Показала обмежену здатність до пояснення варіації даних і передбачень.

Множинна лінійна регресія: Значно покращила точність передбачень завдяки використанню декількох ознак.

Регуляризовані моделі (Ridge, Lasso): Легке покращення точності порівняно з базовою лінійною регресією.

Поліноміальна регресія: Високі результати, особливо з degree 3, що показує значне покращення передбачень.

Регресійна ANN модель: Висока точність на навчальних даних, але з деяким перенавчанням.

PCA 85% та 95%: PCA 95% забезпечує найвищу точність передбачень, майже ідеально пояснюючи варіацію даних.

Загалом, результати дослідження підтверджують важливість вибору відповідної моделі для конкретної задачі, а також необхідність перевірки моделей на різноманітних наборах даних для підтвердження їхньої ефективності та узагальнювальної здатності.

ВИСНОВКИ

В магістерській роботі в процесі дослідження було успішно розроблено математичні моделі, які відображають ключові параметри технологічного процесу виготовлення карамельної маси. Ці моделі дозволяють створити цифрові двійники, які можуть ефективно і в реальному часі імітувати процеси на виробництві, допомагаючи забезпечити стабільність та контроль за якістю продукції.

Показано, що методи машинного навчання, такі як нейронні мережі та регресійні моделі, є ефективними інструментами для аналізу і прогнозування змін технологічних параметрів. Ці методи дозволяють на основі великих масивів даних з процесу виготовлення карамельної маси передбачати майбутні зміни та адаптувати параметри управління в реальному часі, що сприяє покращенню якості та ефективності виробництва.

Впровадження цифрових двійників в існуючу систему автоматизації дозволяє здійснювати постійний моніторинг та оперативне коригування параметрів технологічного процесу. Це значно знижує ймовірність виникнення дефектів у продукції, підвищує енергоефективність та зменшує витрати на сировину, що є важливим для підвищення конкурентоспроможності підприємств.

Завдяки використанню цифрових двійників та методів машинного навчання, процеси виготовлення карамельної маси стають більш контрольованими та прогнозованими. Точний контроль технологічних параметрів дозволяє забезпечити стабільну якість кінцевої продукції, знизити відхилення від заданих стандартів і уникнути перерв у виробництві.

Розроблені математичні моделі та методи їх синтезу можуть бути вдосконалені для застосування в інших технологічних процесах харчової промисловості, а також для інтеграції з іншими системами автоматизації та управління. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку більш складних моделей з використанням глибинного навчання та інших

передових технологій, що дозволить підвищити точність прогнозів і автоматизувати ще більше етапів виробничого процесу.

Результати проведеного дослідження доводять високу ефективність використання цифрових двійників та методів машинного навчання для автоматизації процесу виготовлення карамельної маси, що відкриває нові перспективи для розвитку інтелектуальних систем в промисловості та може стати важливим кроком до покращення виробничих процесів в галузі.

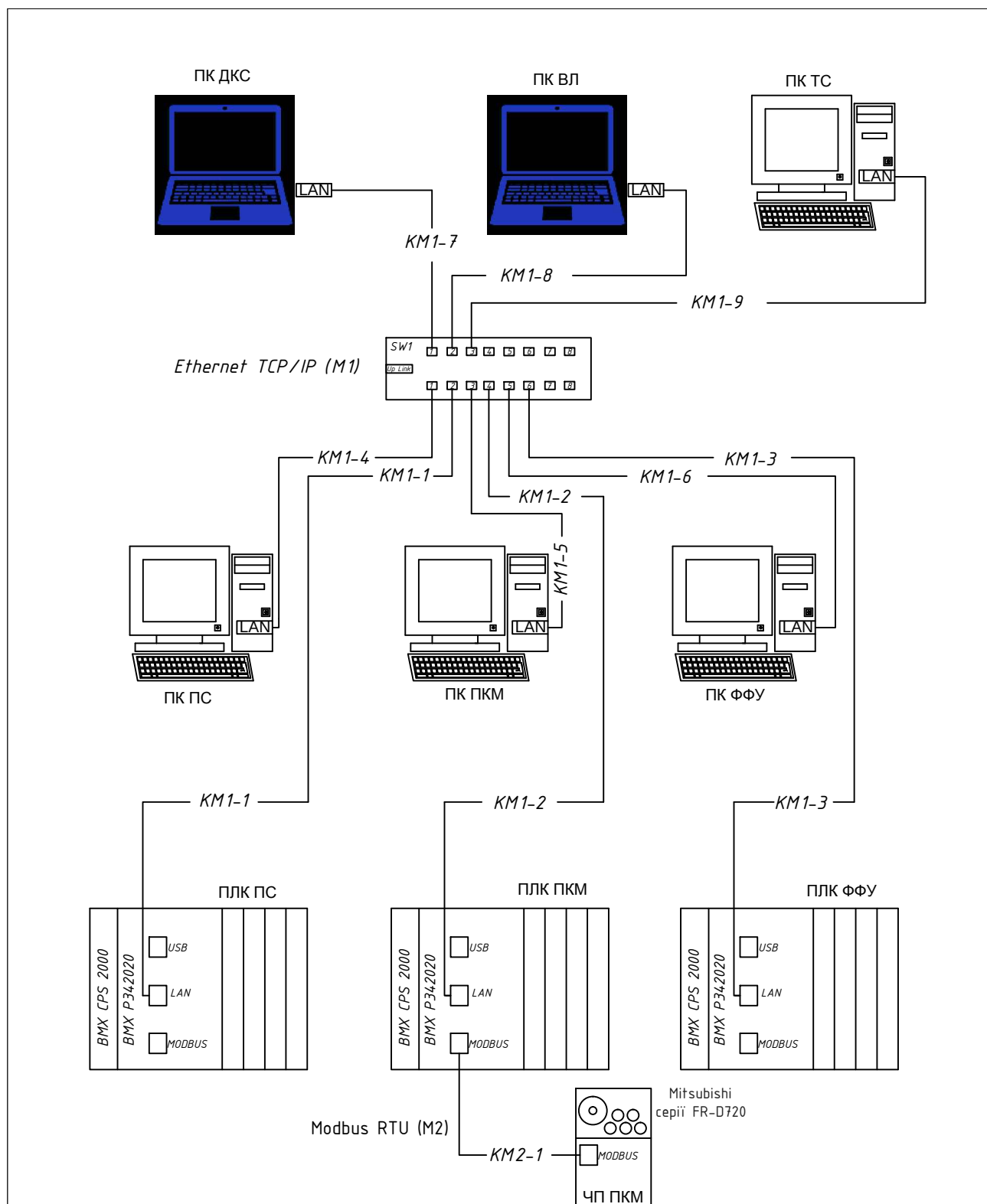
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Технологія виробництва цукрових кондитерських виробів / Скобельська З.Г., Горячева Г.Н. – М.: ІРПО, 2002г. – 416 с.
2. Гірчук О. М. Розвиток ринку кондитерських виробів в Україні: конкурентні аспекти. Науковий огляд ринку кондитерських виробів. 2019. № 15. С. 45-47.
3. Мартиновський В.С., Сьоміна Ю.О. Сучасний стан і перспективи розвитку кондитерської галузі України. Тенденції на сучасному кондитерському ринку України. 2019. № 12. С. 112-113.
4. Склярів В.І. Якість карамелі різних торговельних марок. Товарознавча наука – традиції та сучасність: тези доп. Всеукраїнської наук.- практ. інтер.-конф., м. Харків, 26 лист. 2019 р. Харків : ХДУХТ, 2019. С. 80.
5. Шевчук Г.С. Дослідження властивостей сировини та шляхів удосконалення технології виробництва карамелі. Вісник студентського наукового товариства «ВАТРА» Вінницького торговельно-економічного інституту ДТЕУ. Вінниця: Редакційно-видавничий відділ ВТЕІ ДТЕУ, 2023. Вип.177. С 294-301.
6. Ладанюк А.П. Основи системного аналізу: навчальний посібник / А.П. Ладанюк – Вінниця: Нова книга, 2004. – 176 с.
7. Ладанюк А. П. Системний аналіз складних систем управління: навчальний посібник. / А. П. Ладанюк, Я. В. Смітюх, Л. О. Власенко, Н. А. Заєць, І. В. Ельперін – К.: НУХТ, 2013. – 274 с.
8. Ладанюк А.П. Оперативна ідентифікація складних технологічних об'єктів / А.П.Ладанюк, В.В.Іващук // Вестник СевГТУ. – 2004. – №57. – с.28 – 33.
9. Ладанюк А.П. Інноваційні технології в управлінні складними біотехнологічними об'єктами агропромислового комплексу [Текст] : монографія / Ладанюк А. П., Решетюк В. М., Кишенько В. Д., Смітюх Я. В.. - Київ : Центр учб. літ., 2014. - 279 с.
10. Луцька Н.М. Оптимальні системи управління: конспект лекцій / Н.М. Луцька. – К.: НУХТ, 2013. – 44 с.

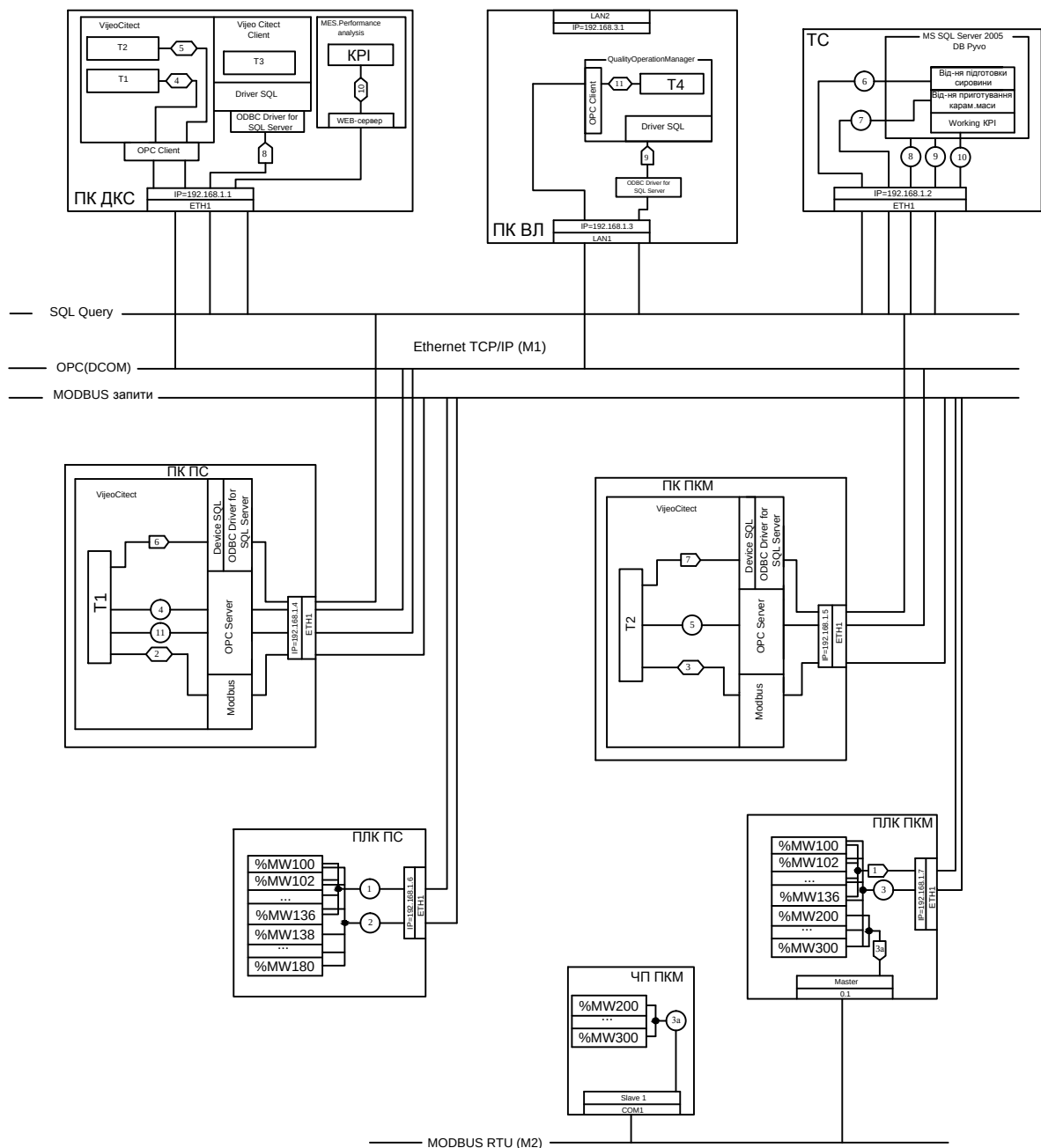
11. Луцька Н.М Керованість та спостережність технологічних об'єктів управління / Н.М. Луцька, Т.В. Савченко // Східно-Європейський журнал передових технологій». – 2010. - №1/5(43). – С. 4 – 7.
12. Насос Bellin типу L [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://mir-nasosov.com.ua/ru/product-ion/bellin-tip-l>.
13. Електромагнітний витратомір OPTIFLUX 7300 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://krohne.com/en/products/flowmeasurement/flowmeters/electromagnetic-flowmeters/optiflux-7300>.
14. Частотний перетворювач Mitsubishi серії FR-D720 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://chastotnik.com.ua/Mitsubis-hi+Elec-tric-r-FR-D720S-070SC-EC>.
15. Електродвигун Able MS90S-4 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://xn--80aqy.com.ua/katalog_elektrodvigatelei_air/air71v8elektrodviga-tel-0-25-kvt-750-ob-min/.
16. Термоелектричний перетворювач ТХК-2088 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://standart-m.com.ua/kipia/termo-preobrazovate-li/termopary/preobrazovateli-termoelektricheskie-thak-2088>.
17. Перетворювач тиску Deltabar FMD71 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.easc.endress.com/ru/Tailormade-field-instrumentation/izmerenie-davleniya/Deltabar-FMD71?t.tabId=product-overview>.
18. Регулятор потоку сипучих матеріалів SolidFlow 2. 0 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.envea.global/s/process/flowmeasurement/solidflow-2-0/>.
19. Електромагнітний клапан GEVAX 1961 1/4" прямої дії N. С. 0 - 16 бар міні [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://goodmax.com.ua/uk/pro-duct/elektromagnitnyj-klapan-gevax-1961-14-pry-amogo-dejstviya-nc-0---16-bar-mini>.
20. Рівнемір VEGACAL 62 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.koda.ua/ukr/products/desc.html?id=636>.

21. Трегуб, В.Г. Проектування систем автоматизації: навч. посібник / В.Г. Трегуб. — Київ: Ліра-К, 2014. — 344 с.
22. Пупена, О.М. Контролери та їх програмне забезпечення. Курс лекцій для студ. напр. 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» денної та заочної форм навчання. Частина 3. / О.М. Пупена, І.В. Ельперін. — К.: НУХТ, 2011. — 48 с.
23. Ельперін, І.В. Програмування промислових контролерів у середовищі UnityPro: навч. посібник / О.М. Пупена, І.В. Ельперін. — Київ: Ліра-К, 2013. — 340 с.
24. Пупена, О.М. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах: навч. посібник / О.М. Пупена, І.В. Ельперін, Н.М. Луцька, А.П. Ладанюк. — Київ: Ліра-К, 2011. — 552 с.
25. Пупена, О.М. Інтеграція систем управління / О. М. Пупена, І. В. Ельперін. // Харчова і переробна промисловість. — 2005. — №1. — С. 9–11.
26. Пупена, О.М. Автоматизовані системи керування виробництвом — призначення, структура відповідно до ISA-95 — Режим доступу до ресурсу: <https://www.tda.in.ua/18-2-mes-%D0%BD%D1%83%D1%85%D1%82/7-isa-95-%D0%BF%D1%83%D0%BF%D0%B5%D0%BD%D0%B0>
27. Керування періодичними процесами та виробництвами на базі сучасних технологій та стандартів (ISA-88). — Режим доступу до ресурсу: <https://www.tda.in.ua/16-2-batch-isa-88-%D0%BD%D1%83%D1%85%D1%82>
28. Кутовська О. В. Методологія системного підходу та наукових досліджень: курс лекцій. / О. В. Кутовська — Тернопіль: Економічна думка, 2005. — 124 с.
29. Документація на контролери фірми Schneider Electric.
30. Згуровський М. З. Основи системного аналізу / М. З. Згуровський, Н. Д. Панкратова — К.: Видавнича група ВНУ, 2007. — 544 с.
31. Стивенсон В. Дж. Управление производством / В. Дж. Стивенсон. — М.: БИНОМ; Лаборатория Базовых Знаний, 2002. — 928 с.

32. Дорф Р. Современные системы управления/ Р. Дорф, Р. Бишоп [пер. с англ. Б. И. Копылова.] – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
33. Федосеев С. А. Современные механизмы и инструменты управления большими системами / С. А. Федосеев, М. Б. Гитман М.Б., В. Ю. Столбов // Управление большими системами: сборник трудов. – 2010. – № 30. – С. 164 – 179.
34. Ладанюк А. П. Сучасні методи автоматизації технологічних об'єктів монографія / А.П. Ладанюк, О. А. Ладанюк, Р. О. Бойко, В. В. Іващук, Д. О. Кроніковський, Д. А. Шумигай. – К.: Інтер Логістик Україна, 2015. – 408 с.
35. Ладанюк А.П. Методи сучасної теорії управління / А.П. Ладанюк, В.Д. Кишенько, Н.М. Луцька, І.В. Іващук. – К.:НУХТ, 2010. – 196 с.
36. Тимофеев А. В. Интеллектуализация систем автоматического управления /А.В. Тимофеев, Р.М. Юсупов // Известия РАН. Техническая кибернетика. – 1994. – № 5. – С. 211–224.
37. Васильков В. Г. Організація виробництва: навч. посібник. / В. Г. Васильков – К.: КНЕУ, 2003. — 524 с.
38. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако. – М.: Мир, 1973. – 344 с.
39. Цвик Д. П. Асортиментна політка торговельних підприємств у ринковій економіці України/ Д.П. Цвик// Збірник науково-технічних праць. – Львів : НЛТУ України. – 2008. – Вип. 18.7. – 308 с.
40. Ансофф И. Стратегическое управление/ И. Ансофф: сокр.пер.с англ./науч.ред. и авт.предисл. Л.И. Евенко. – М.: Экономика, 1989. – 519 с.



					Кваліфікаційна робота			
					Синтез математичних моделей цифрових двійників з використанням методів машинного навчання для автоматизації процесу виготовлення карамельної маси	Літ.	Маса	Масштаб
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Лисенко М.М.						
Керівник		Сідлецький В.М.						
Зав. каф.		Смітюх Я.В.				Аркуш 3	Аркушів	4
Секретар		Мацебула Д.В.			Схема з'єднань промислових мереж	НУХТ АК-2-1М		



Кваліфікаційна робота

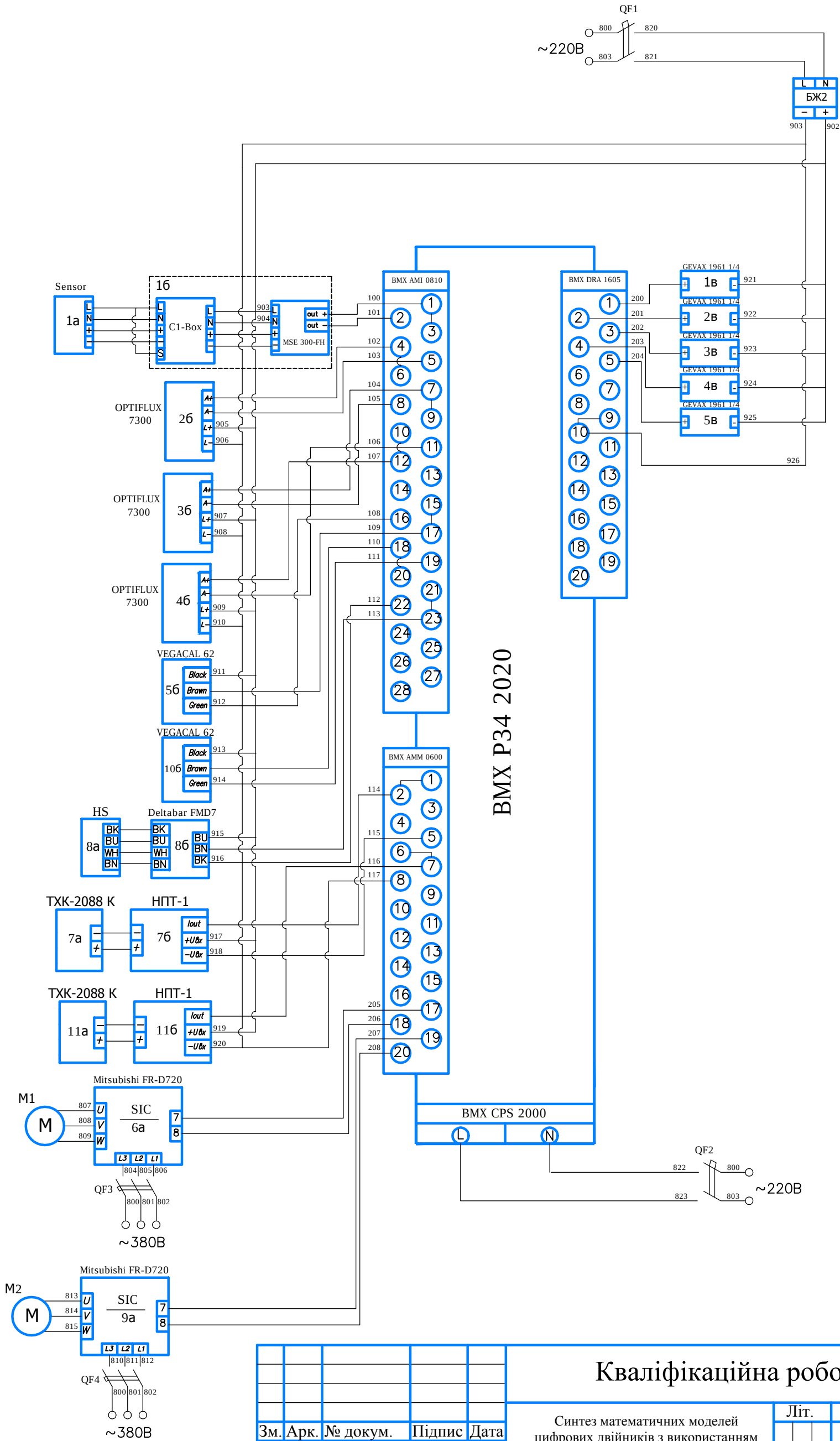
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Лисенко М.М.		
Керівник		Сідлецький В.М.		
Зав. каф.		Смітюх Я.В.		
Секретар		Мацебула Д.В.		

Синтез математичних моделей цифрових двійників з використанням методів машинного навчання для автоматизації процесу виготовлення карамельної маси

Схема мережевих інформаційних потоків

Літ.	Маса	Масштаб
Аркуш 4	Аркушів 4	

НУХТ
АК-2-1М



Кваліфікаційна робота

					Кваліфікаційна робота				
					Синтез математичних моделей цифрових двійників з використанням методів машинного навчання для автоматизації процесу виготовлення карамельної маси	Літ.	Маса	Масштаб	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Лисенко М.М.							
Керівник		Сідлецький В.М.							
Зав. каф.		Смітюх Я.В.							
Секретар		Мацебула Д.В.							
					Принципова схема контурів вимірювання, регулювання та управління	НУХТ			
						АК-2-1М			

