

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ННІТІ ім.акад. І.С.Гулого

Кафедра мехатроніки та пакувальної техніки

«До захисту в ЕК»
Директор інституту (декан факультету)
_____ Блаженко С.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

« ___ » _____ 20__ р.

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Соколенко А.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

« ___ » _____ 20__ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

зі спеціальності

131 Прикладна механіка
(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми

Прикладна механіка

на тему: Дослідження технологічних параметрів гідравлічної мехатронної системи FESTO EduKit PA Advanced

Виконав: здобувач 2 курсу, групи ЗМ

Глуценко Іван Сергійович
(прізвище, ім'я, по батькові повністю)

_____ (підпис)

Керівник

проф., д.т.н. Якимчук М.В.
(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

_____ (підпис)

Консультанти

_____ (прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент

_____ (прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що в цій кваліфікаційній роботі немає запозичень із праць інших авторів без відповідних посилань.

Здобувач _____ (підпис)

Київ – 2021р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) ННІТІ ім. акад. І.С.Гулого

Кафедра мехатроніки та пакувальної техніки

Освітній ступінь Магістр

Спеціальність 131 Прикладна механіка
(код і назва)

Освітньо-професійна програма Прикладна механіка
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МПТ

Соколенко А.І.

“05” листопада 2020 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Глущенко Іван Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження технологічних параметрів гідравлічної мехатронної системи FESTO EduKit PA Advanced

керівник роботи:

проф., д.т.н. Якимчук М.В.

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від “05” 11 2020 року №925-кс

2. Строк подання здобувачем роботи 02.02.2021

3. Вихідні дані до роботи обладання для дозування рідких харчових продуктів створене на основі мехатронних модулів

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
Реферат. Розділ 1 Загальна характеристика промислових мехатронних систем. Висновки до розділу №1. Постановка задачі дослідження. Розділ 2 Опис дослідної установки . Висновки до розділу №2. Розділ 3 Дослідження технологічних параметрів гідравлічної мехатронної системи. Висновки до розділу №3. Розділ 4 Експериментальні дослідження витратної характеристики гідравлічної мехатронної системи Festo EduKit PA Advanced. Висновки до розділу №4. Розділ 5 Експериментальні дослідження енергетичних витрат гідравлічної мехатронної системи в процесі дозування рідкої харчової продукції. Висновки до розділу №5. Загальні висновки до роботи. Список використаної літератури

5. Перелік графічного матеріалу

Презентація до доповіді

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання _____ 5.11.2020 р. _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підготовка дослідної установки до експериментальних досліджень	27.01.2020	
2.	Реферат	17.02.2020	
3.	Розділ 1. Загальна характеристика промислових мехатронних систем	03.03.2020	
4.	Розділ 2. Опис дослідної установки	09.04.2020	
5.	Розділ 3. Дослідження технологічних параметрів гідравлічної мехатронної системи	04.06.2020	
6.	Розділ 4. Експериментальні дослідження витратної характеристики гідравлічної мехатронної системи Festo EduKit PA Advanced	25.08.2020	
7.	Модернізація дослідної установки	03.09.2020	
8.	Розділ 5. Експериментальні дослідження енергетичних витрат гідравлічної мехатронної системи в процесі дозування рідкої харчової продукції	01.10.2020	
9.	Загальні висновки до роботи	22.11.2020	
10.	Список використаної літератури	05.12.2020	
11.	Підготовка до презентації	20.12.2020	

Здобувач

_____ (підпис)

Глущенко І.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Якимчук М.В.

(прізвище та ініціали)

Зміст

Реферат.....	1
Розділ 1. Загальна характеристика промислових мехатронних систем.....	3
1.1 Поняття “Промислова мехатроніка”.....	3
1.2 Класифікація мехатронних систем.....	6
1.3 Структура мехатронної системи.....	8
1.3.1 Датчики та їх класифікація.....	10
1.3.2 Виконавчі механізми та їх класифікація.....	12
1.3.3 Програмовані логічні контролери та їх класифікація.....	13
1.4 Сучасні тенденції розвитку промислової мехатроніки.....	15
1.5 Машини для дозування і фасування рідкої продукції.....	17
1.5.1 Характерні конструктивні схеми трикамерних фасувальних пристроїв	21
1.5.2 Напрямки вдосконалення пристроїв для фасування рідин в жорстку споживчу тару.....	22
1.5.3 Короткий огляд систем фасування фірми KRONES.....	23
1.5.4 Короткий огляд систем фасування фірми KHS.....	25
1.5.5 Особливості конструктивних виконань пристроїв фасування в машинах з лінійним компонуванням.....	29
1.5.6 Характеристика промислових витратомірів.....	33
Висновки до розділу №1	37
Постановка задачі дослідження.....	38
Розділ 2. Опис дослідної установки.....	39
2.1 Конструкція та принцип роботи дослідної установки.....	39
2.2 Монтаж та схема підключення основних компонентів системи.....	40
2.3 Робочі органи дослідної установки.....	44
2.4 Вимірювальні прилади.....	47
2.4.1 Електронні давачі сигналів.....	47
2.4.2 Контрольні вимірювальні пристрої.....	53
2.5 Система керування дослідної установки.....	56
2.5.1 Структура системи керування.....	56
2.5.2 Програмне забезпечення.....	57
2.5.3 Електричне оснащення та загальна схема підключення.....	59
Висновки до розділу №2.....	67

Розділ 3. Дослідження технологічних параметрів гідравлічної мехатронної системи.....	68
3.1 Трубопровідна мережа.....	68
3.2 Характеристика насосних станцій.....	75
3.3 Робота відцентрових насосів на зовнішню мережу.....	77
3.4. Побудова напірної характеристики трубопровідної мережі дослідної установки <i>Festo EduKit PA Advanced</i>	79
3.5. Побудова робочої характеристики насосної станції <i>SPX Johnson Circulating pump 24V</i>	84
Висновки до розділу №3.....	88
Розділ 4. Експериментальні дослідження витратної характеристики гідравлічної мехатронної системи Festo EduKit PA Advanced.....	89
4.1 Обґрунтування вибору факторів.....	89
4.2 Статистичне опрацювання результатів.....	92
4.3 Обробка дослідних даних.....	94
4.4 Перевірка значущості коефіцієнтів регресії.....	96
4.5 Перевірка адекватності рівняння регресії (за критерієм Фішера).....	99
4.6 Математично-статистичне рівняння витратної характеристики гідравлічної мехатронної системи.....	100
Висновки до розділу №4	103
Розділ 5. Експериментальні дослідження енергетичних витрат гідравлічної мехатронної системи в процесі дозування рідкої харчової продукції.....	104
5.1. Модернізація мехатронної системи.....	105
5.2. Налагоджування роботи та програмування мехатронної системи.....	111
5.2.1. Налаштування комунікації між пристроями.....	113
5.2.2. Програмування ПЛК.....	115
5.3. Експериментальні дослідження.....	118
Висновки до розділу №5	123
Загальні висновки до роботи.....	126
Список використаної літератури.....	128

Реферат

Метою даної роботи є дослідження технологічних параметрів гідравлічної мехатронної системи *FESTO EduKit PA Advanced*.

Актуальність теми досліджень пов'язана з екстенсивним розвитком технологій для виробництва та переробкою рідких харчових продуктів, а також необхідністю дослідження мехатронних комплексів за допомогою сучасних програмних комплексів та ПЛК. Навички проведення наукових досліджень із використанням мікропроцесорних технологій є особливо важливими при розробці сучасного обладнання та тестування нових технологій на виробництві.

В першому розділі представлена загальна класифікація та структура сучасних мехатронних систем. Увага приділяється класифікації робочих органів, давачів зворотнього зв'язку, ПЛК, а також сферам їхнього застосування на сучасному виробництві.

Другий розділ присвячений детальному опису конструкції, принципу роботи *FESTO EduKit PA Advanced*, інтерфейсу *EasyPort* та програмного середовища *FluidLab-PA process*.

В третьому розділі були проведені аналітичні та експериментальні дослідження гідравлічної мехатронної системи а саме : напірної характеристики трубопровідної мережі та робочої характеристики насосної станції. Проведення експериментальних досліджень здійснювалась за допомогою інтерфейсу *EasyPort* та середовища *FluidLab-PA process*, аналіз та обробка отриманих результатів з використанням програмного комплексу *MathCad*.

Четвертий розділ дипломної роботи присвячений експериментальним дослідженням гідравлічної мехатронної системи за допомогою багатофакторного експерименту.

В п'ятому розділі описується модернізація гідравлічної мехатронної системи *FESTO EduKit PA Advanced* та проведення досліджень по енергоспоживанню та коливань рівня рідини у витратному резервуарі в процесі дозування.

Дипломний проект складається з 5 розділів та 128 аркушів пояснювальної записки.

Ключові слова: гідравлічна мехатронна система, енерговитрати в процесі дозування рідкої продукції, дослідження мехатронної системи.

Summary

This master's thesis is dedicated to the study of technological parameters of *FESTO EduKit PA Advanced* hydraulic mechatronic system.

The relevance of the given topic is related to the extensive development of technologies for the production and processing of the liquid products, as well as the need to study mechatronic systems using modern software and PLCs. Research skills using microprocessor technologies are especially important in the development and testing of the new equipment and technologies in the production.

The first chapter presents general classification and structure of modern mechatronic systems. The attention is drawn to classification of actuators, gauges, PLCs and their area of application in modern production.

The second chapter is dedicated to detailed design description, principle of operation and structure of *FESTO EduKit PA Advanced*, *EasyPort* interface and *FluidLab-PA process* software.

In the third section, analytical and experimental studies of the technological parameters of the hydraulic mechatronic system were carried out, namely: the pressure characteristics of the pipeline network and the operating characteristics of the pump station. Experimental studies were performed using the *EasyPort* interface and the *FluidLab-PA process* software. Analysis and processing of the obtained results was carried out using the software package *MathCad*.

The fourth section of the thesis is devoted to the experimental study of the hydraulic mechatronic system by conducting a multifactor experiment.

In the fifth chapter it is described the modernization of the *FESTO EduKit PA Advanced* hydraulic mechatronic system and conducting research on energy consumption and fluctuations of the liquid level in the product tank during dosing.

Diploma paper consists of 5 chapters and 128 pages of explanatory notes.

Key words: hydraulic mechatronic system, energy consumption during dosing of the liquid food product, study of mechatronic system.

Розділ 1. Загальна характеристика промислових мехатронних систем

1.1 Поняття “Промислова мехатроніка”

Аналіз етапів науково-технічного прогресу, що слугували появі поняття **мехатроніка** (від англ. – mechatronics), показує, що розвиток промислового виробництва завжди відбувався під ознакою підвищення продуктивності та якості продукції. Цього звичайно можна було б досягти, у першу чергу, вилученням людини з безпосередньої участі в технологічному процесі через невідповідність її фізіологічних можливостей необхідним умовам та параметрам технологічного процесу (високі швидкості, тиск, вакуум, температура, мікромініатюризація об’єктів тощо). У низці ключових етапів науково-технічного прогресу чільне місце посідають явища механізація та автоматизація виробництва.

Механізація – це етап розвитку виробництва, який характеризується вивільненням людини від м’язових зусиль, що пов’язані в першу чергу із пересуванням предметів і знарядь праці.

Автоматизація – це наступний після механізації етап, що характеризується звільненням людини (частково або повністю) не тільки м’язових, а і від розумових витрат, пов’язаних із її безпосередньою участю в процесах отримання, перетворення, передачі та використання енергії, матеріалів чи інформації. Однією із складових автоматизації, є **автоматика** – галузь теоретичних і практичних знань про пристрої та системи, які діють автоматично.

Електротехніка – це галузь науки і техніки, пов’язана із застосуванням електричних і магнітних явищ для перетворення енергії, обробки матеріалів, передачі інформації тощо, та яка охоплює проблеми отримання, перетворення та використання електроенергії у практичній діяльності людини.

Інформатика – це галузь знань, яка вивчає структуру та загальні властивості наукової інформації, а також питання, пов'язані із її пошуком, збиранням, зберіганням, перетворенням та поширенням у різних сферах діяльності, у тому числі промислового виробництва.

Підтримання необхідних умов взаємодії технологічного обладнання з об'єктами промислового виробництва, тобто керування режимами роботи обладнання за попередньо заданою програмою, забезпечують за допомогою **програмного керування**. Воно охоплює як забезпечення заданих законів руху виконавчих органів, так і зміни фізичних і хімічних параметрів технологічного процесу (температура, тиск, витрата, рівень, швидкість). Основними технічними засобами для розв'язання цієї задачі є електронно-обчислювальні машини (ЕОМ), міні-ЕОМ, персональні ЕОМ (ПЕОМ), вільно програмовані логічні контролери, а також міні- та мікро- контролери.

Взаємодія між комп'ютерами у сфері промислового виробництва, маркетингу, менеджменту і науки стала все більш необхідною не тільки для великомасштабних проектів, але й для підвищення рівня автоматизації виробництва. Тому стало необхідним створення комп'ютерних мереж, які б містили не тільки ПЕОМ, але й контролери. У цьому сенсі набула актуальності розробка промислового комп'ютера (Industrial PC або IPC), який відповідає рівню автоматизації у промисловості і технології виробництва комп'ютерів, що отримали назву вільно програмованих контролерів (ВПК).

Розвиток інформатики та кібернетики був би неможливим без бурхливого розвитку **електроніки** – науки про взаємодію заряджених часток з електромагнітними полями та про методи створення електронних приладів і пристроїв, які використовуються в основному для передачі, обробки та збереження інформації.

Комбінація англійських слів "MECHAnics" та "elecTRONICS" привела до утворення сучасного терміну "MECHATRONICS" (в англійській транскрипції «МЕХАТРОНІКС»), який вперше був застосований японською

фірмою **Yaskawa Electric** 1969 році, та зареєстрований як торговельна марка у 1972 році .

При перекладі на українську мову у відповідності до існуючих правил утворення складних слів, наприклад, «механотрон», «механострикція», «механохімія», цей термін очевидно має вимовлятися та писатися в україномовній транскрипції як «МЕХАНОТРОНІКА». Спираючись на ці міркування, можна цілком обгрунтовано і закономірно вважати, що поширений на початку 80-х років термін МЕХАНОТРОНІКА завдячує своєю появою тісній інтеграції нагромаджених знань у галузях **механіки** та **електротехніки** з одержаними знаннями у таких галузях науки як **електроніки** та **кібернетика**, які розвиваються досить бурхливо.

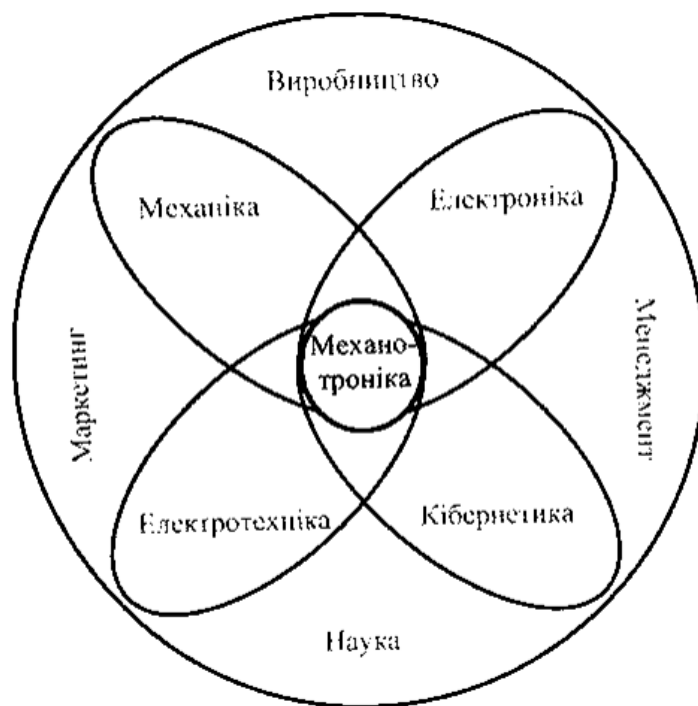


Рис.1.0 Графічний символ механотроніки

Виходячи з вище сказаного, графічним символом механотроніки можна вважати чотири овали, що перетинаються і утворюють чотирилопасткову фігуру (рис. 1.0), поміщену до зовнішньої оболонки «Наука-виробництво-менеджмент- маркетинг». Зважаючи на специфіку розвитку сучасного

промислового виробництва, можна запропонувати таке формулювання поняття «промислова механотроніка».

Промислова механотроніка - це сучасний напрям розвитку автоматизації промислового виробництва на основі модульного принципу побудування автоматичних машин та виробничих систем, при об'єднанні на конструкторсько-технологічному рівні максимально орієнтованих на виконання конкретного технологічного процесу механічних, електротехнічних, електронних компонентів і програмних засобів, з метою забезпечення заданих технологічних параметрів системи.

1.2 Класифікація мехатронних систем

Найперша класифікація мехатронних систем була запропонована японською організацією **JSPMI** (Japan Society for the Promotion of Machine Industry) в 1970 році, яка поділила мехатронні системи на чотири класи:

1. Клас 1. За основу взято механічну систему із вбудованою електронікою для розширення функціональних можливостей машини, наприклад: станки з ЧПК або двигуни із частотним керуванням.
2. Клас 2. Традиційні механічні системи із значно модернізованими внутрішніми пристроями, що включають електроніку, але без зовнішніх користувацьких інтерфейсів, наприклад :різальні машини і автоматичні виробничі системи.
3. Клас 3. Системи, що функціонально залишаються механічними, але внутрішні механізми замінені на електроніку, наприклад: цифровий годинник.
4. Клас 4. Машини побудовані із застосуванням механічних і електронних елементів на основі синергетичної інтеграції, наприклад: сканери, «розумні» пральні машини, автоматичні кухонні печі та ін..

Наведені приклади для кожного класу мехатронних систем ілюструють тісний прогрес електромеханічних пристроїв із розвитком теорії керування,

обчислювальної техніки і мікропроцесорних технологій. Можна із впевненістю сказати, що лише 4-й клас машин в поданій класифікації, можна віднести до по-справжньому мехатронних, через системну інтегрованість механіки та електроніки. Що не було можливе до 1970-х років, із початком бурхливого розвитку мікропроцесорних технологій компанією Intel. Відтоді інтегрованість обчислювальних пристроїв стала невід'ємною частиною багатофункціональних систем.

Сучасні мехатронні системи також можна розділити за поколіннями системи керування:

- Мехатронні системи I-го покоління, функціональність яких цілком залежить від керуючої програми. Переналаштовування на нову програму, або пристосовування програми керування до змін в навколишньому середовищі не можливе без участі людини. Дані системи керування найчастіше використовуються в сьогоденній промисловості.
- Мехатронні системи II-го покоління, які реагують на зміну в зовнішньому середовищі. Їх називають адаптивними, і вони мають розвинену систему сприйняття інформації про зовнішнє середовище, перетворюючи її в керуючу інформацію реального часу. Дане покоління мехатронних систем має потужну обчислювальну систему на базі мікропроцесорної техніки і має високі функціональні показники.
- Мехатронні системи III-го покоління, інтелектуальні. Дані системи працюють як МС I,II-го покоління, тобто вони сприймають інформацію про зміну навколишнього середовища, і коригують свою поведінку у відповідності до змін. Дані МС відрізняються від попередніх тим, що вони планують свою поведінку і вирішують поставлену задачу відповідно до поставлених критеріальних та певних обмежень, при

цьому серед можливого ряду вирішення задачі вибирають найкращий спосіб.

1.3 Структура мехатронної системи

Промислова механотроніка являє собою не просте поєднання елементів механіки та електроніки. Її слід оцінювати як нову технологію, за якої до механізму, складеного з «фізичних тіл», долучають інформаційне та програмне забезпечення, що реалізує обробку інформації.

Узагальнену схему робочого механізму, що складає механотронну систему, орієнтовану на задачі автоматизованого виробництва, наведено на рис.1.1. Як бачимо така мехатронна система складається із наступних структурних компонентів:

- Робочий орган (РО);
- Виконавчий пристрій;
- Привідний механізм;
- Система внутрішніх та зовнішній зворотніх зв'язків;
- Зовнішній та внутрішній вільно програмовані контролери (ЗВПК та ВВПК);
- Людино-машинний інтерфейс або НМІ;

Як бачимо мехатронна система представляє ієрархічну структуру, яка складається із зовнішнього та внутрішнього контурів керування для кожного з яких характерна наявність власної системи зворотніх зв'язків, які дають змогу пристосовуватись до зовнішніх та технологічних збурень.

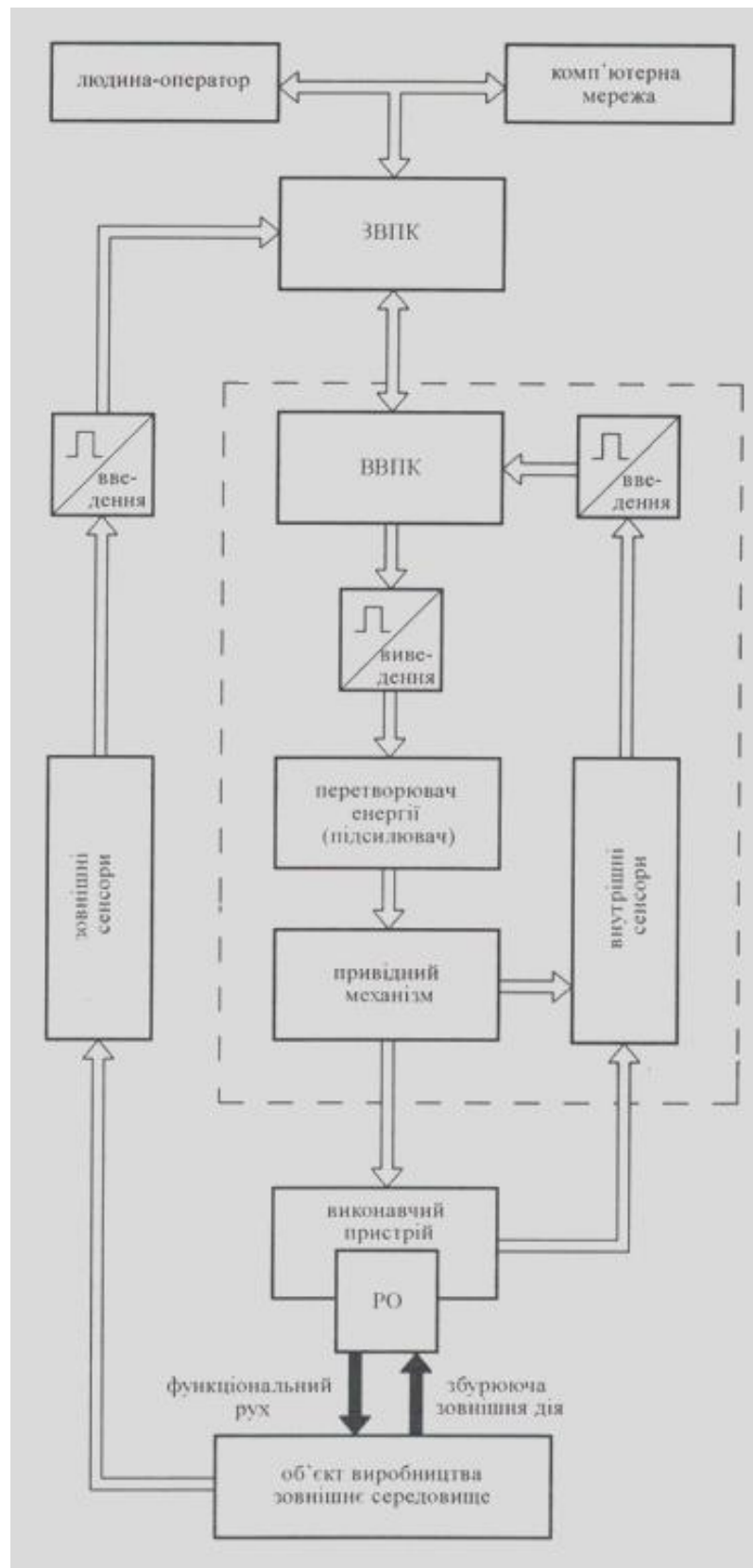


Рис.1.1. Узагальнена схема робочої машини на базі мехатронних модулів руху

1.3.1 Датчики та їх класифікація

На сьогоднішній день майже не можливо уявити технологічне обладнання без різноманітних датчиків, які дають змогу контролювати технологічні процеси. Така необхідність викликана високими вимогами до якості продукції, безпечністю обладнання та загальною ефективністю машини.

Датчик (сенсор) – пристрій, який призначений для перетворення інформації у вигляді деякої фізичної величини, в іншу функціональну величину, для подальшого використання в елементах мехатронних систем.

На сьогоднішній день ринок електронних вимірювальних пристроїв дуже різноманітний, більшість компаній мають визначену орієнтацію на вирішення певних технологічних задач і виробляють відповідні датчики. Тому при необхідності, все-таки можна виокремити деяких виробників (рис.1.2) , які є досить популярними при вирішенні конкретних технологічних задач.



Рис.1.2 Виробники сучасних вимірювальних пристроїв: 1 – ifm electronic; 2 – Keyence; 3 – Endress+Hauser; 4 – Pepperl+Fusch GmbH;

Сучасне різноманіття датчиків в мехатронних системах можна представити у вигляді класифікації, яку подано на рис.1.3. у вигляді структурної схеми.

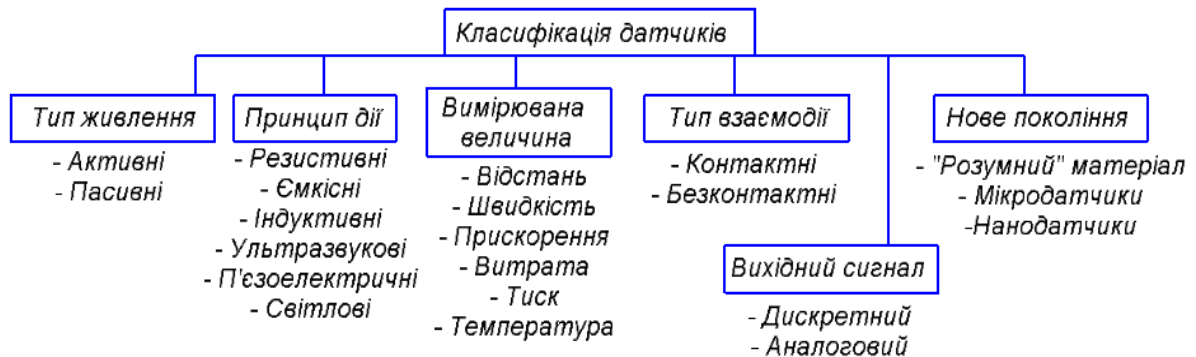


Рис.1.3. Класифікація датчиків

Для промисловості існують наступні стандарти сигналів датчиків:

- Діапазон по струму (4-20мА ; 0-20мА) – менш чутливий до електричних шумів, а також стійкий при передачі сигналу на великі відстані;
- Діапазон по напрузі (0-10В) – рідко використовується через чутливість до електричних шумів, а також нестабільність сигналу при передачі на значні відстані через падіння напруги у провіднику.

На стадії розробки мехатронної системи для підбору оптимальних датчиків необхідно розуміти особливості технологічного процесу, наявність впливу несприятливих чинників (температури, вібрації, вологості та ін.) на вимірювальні прилади, а особливо технічні характеристики датчиків (точність, інтерфейс комунікації, діапазон вимірювань) та в деяких випадках конструктивні особливості.

1.3.2 Виконавчі механізми та їх класифікація

Виконавчими механізмами називають апаратні пристрої, які фізично здійснюють керуючі дії: зміна позиції, швидкості, тиску, зусилля, крутного моменту, прискорення, енергії або комбінації.

Класифікацію сучасних виконавчих механізмів можна зобразити у вигляді структурної схеми, рис.1.4.



Рис.1.4. Класифікація мехатронних модулів руху

Відповідно до поданої вище класифікації на Рис.1.5 можна виділити, групи робочих органів: 1 – двигуни змінного струму SIMOTICS, 2 – серводвигуни SIMOTICS, 3 – електромагнітні реле ABB, 4 – електромеханічні лінійні двигуни FESTO, 5 – пневматичні лінійні двигуни FESTO;

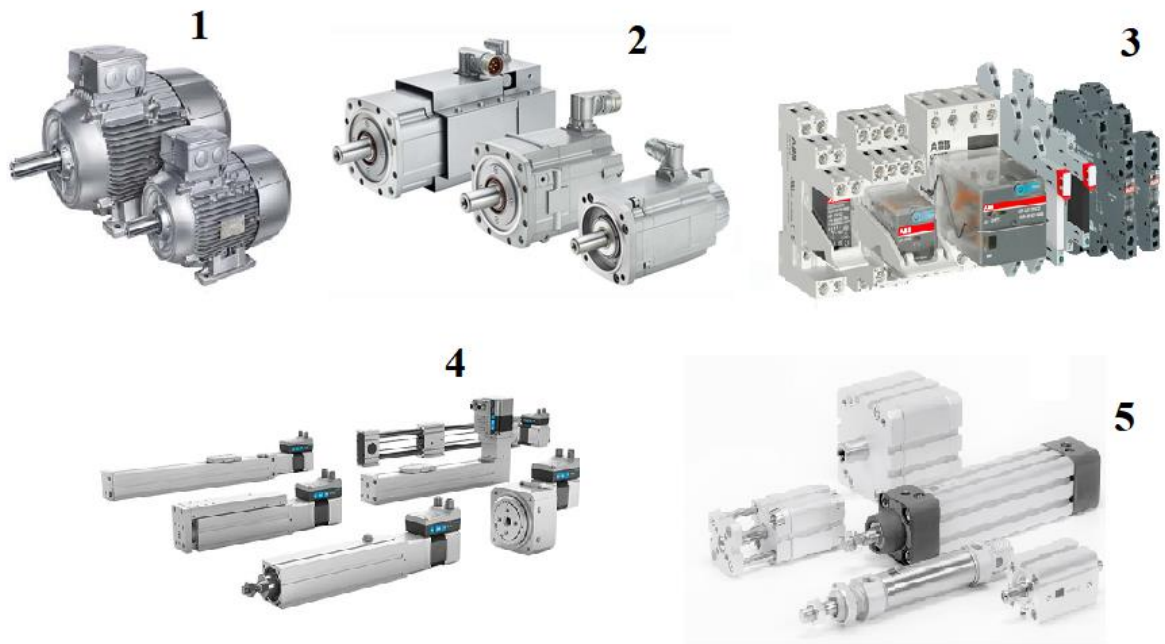


Рис.1.5 Виконавчі органи мехатронних систем: 1 – двигуни змінного струму; 2 – серводвигуни; 3 – електромагнітні реле; 4 – електромеханічний привод лінійної дії; 5 – пневмо-привод;

1.3.3 Програмовані логічні контролери та їх класифікація

Програмований логічний контролер (ПЛК) - це спеціалізований мікропроцесорний керуючий пристрій, пристосований до використання безпосередньо у виробничих умовах і програмований на спрощених мовах, доступних користувачам, що не мають спеціальної підготовки із програмування.

На сьогоднішній день із стрімким розвитком мікропроцесорних технологій існує велике різноманіття ПЛК, а також виробників мікропроцесорних керуючих пристроїв, що використовуються для керування різноманітних машин та технологічних процесів.

До найвідоміших виробників ПЛК в світі на сьогоднішній день належать : **SIEMENS, Allen-Bradley , ABB, Schneider, Mitsubishi ELECTRIC** (Рис.1.6) та ін.

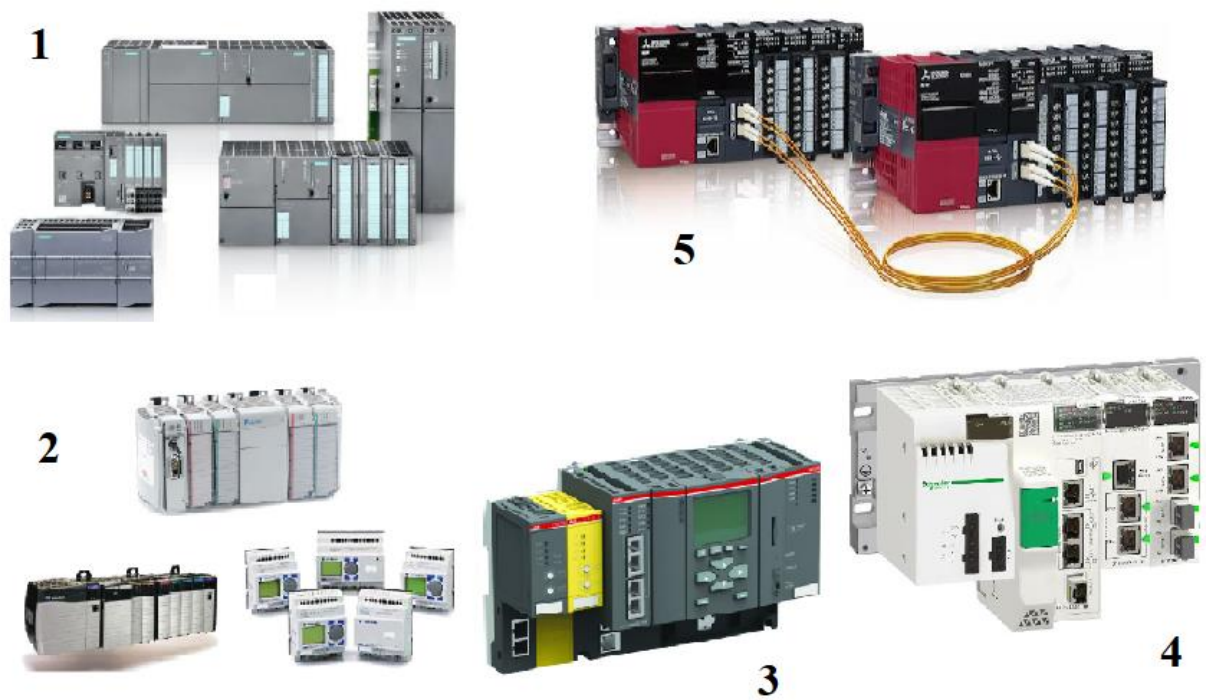


Рис.1.6 Сучасні виробники ПЛК: 1 – SIEMENS; 2 – Allen-Bradley; 3 – ABB; 4 – Schneider; 5 – Mitsubishi ELECTRIC;

Все це різноманіття ПЛК можна розрізнити за наступною класифікацією:

1) Розташування модулів вводу-виводу:

1.1 Моноблочні ПЛК – заміна і видалення модулів вводу-виводу не можлива;

1.2 Модульні ПЛК – заміна модулів можлива, конструкція складається із модуля центрального процесору ЦП, а також змінними модулями вводу-виводу;

1.3 Розподілені ПЛК – модулі вводу-виводу винесені за рамки ПЛК і з'єднуються з ним за допомогою промислових мереж (PROFINET, PROFIBUS);

2) За способом монтажу:

2.1 Панельні – монтаж здійснюється на дверці електричної шафи, або на панелі;

2.2 DIN-рейкові – монтаж здійснюється всередині шафи на DIN-рейку;

2.3 Стійкові – ПЛК монтується на стійку;

3) За сферами застосування:

3.1 Загальнопромислові універсальні ПЛК;

3.2 Комунікаційні ПЛК;

3.3 ПЛК для керування роботами;

3.4 ПЛК спеціального призначення;

3.5 ПЛК для керування переміщенням і позиціонування;

4) мови програмування:

4.1 класичні алгоритмічні мови(C, C#, Visual Basic);

4.2 мови стандарту **ІЕС 61131-3** (LD, FBD, SFC, ST, IL);

1.4 Сучасні тенденції розвитку промислової мехатроніки

На зміну максимальній оптимізації механізмів і систем приходить еволюційність, заснована на концепції агрегатно-модульного (блоковомодульного) побудування технологічного обладнання, свідченням якого і є інтенсивний розвиток механотронних систем.

Швидкі зміни та зростаюча конкуренція на ринку високих технологій змушує всі орієнтовані на перспективу підприємства забезпечувати термінове виготовлення своєї продукції, а також перехід на нові рівні точності та якості, дуже широкої номенклатури та асортименту виробів, не забуваючи про їх конкурентоспроможну вартість.

Розвиток механотроніки, як науково-технічного напрямку автоматизації, крім очевидних конструкторсько-технологічних проблем для сучасних підприємств, спричинив й цілу низку нових організаційно-економічних завдань:

По-перше, потрібна структурна інтеграція підрозділів механічного, електронного та інформаційного профілів (котрі донині, як правило, функціонували автономно) до єдиних проектних і виробничих колективів.

По-друге, необхідна інтеграція інформаційних технологій з різних науково-технічних областей (механіка, електроніка, електротехніка, інформатика, технічна кібернетика) до єдиного інструментарію для комп'ютерної підтримки розв'язання задач механотроніки.

По-третє, необхідно організувати підготовку «механотронно-орієнтованих» інженерів і менеджерів, здатних здійснювати системну інтеграцію і керівництво роботою вузько профільованих фахівців різної кваліфікації.

По-четверте, потрібна стандартизація та уніфікація усіх використаних елементів і технологічних процесів при проектуванні та виробництві механотронних систем та їх елементів.

По-п'яте, потрібно широко застосовувати технології автоматизованого проектування алгоритмів і програм, відпрацювання програмного забезпечення для керуючих ЕОМ або мікропроцесорів, уніфікація алгоритмів програм з метою використання типових програмних модулів.

Розв'язання зазначених проблем часто потребує перегляду певних сталих традицій у керуванні та подоланні амбіцій менеджерів середньої ланки, які звикли вирішувати тільки свої суто профільні задачі. Саме тому, середні та малі підприємства, котрі можуть легко та гнучко змінювати свою структуру, опиняються більш підготовленими для переходу до виробництва механотронної продукції. На основі аналізу таких фундаментальних факторів, які допомагають встановленню і розвитку механотроніки, як нові тенденції світового індустріального розвитку можна виділити наступні тенденції розвитку та основні вимоги світового ринку у галузі автоматизації виробництва на базі механотроніки:

- необхідність випуску та сервіс обладнання у відповідності до міжнародних стандартів якості, ISO 9000;

- інтернаціоналізація ринку науково-технічної продукції і, як наслідок, необхідність активного впровадження у практику форм і методів міжнародного інжинірингу та трансферу технологій;
- підвищення ролі малих і середніх виробничих підприємств, завдяки їх здатності швидкого і гнучкого реагування на зміни вимог ринку;
- бурхливий розвиток комп'ютерних систем і технологій, засобів телекомунікацій, прямим наслідком якого стало створення інтелектуальних систем керування механічними рухами і технологічними функціями сучасних робочих механізмів.

1.5. Машини для дозування і фасування рідкої продукції

Рідка продукція дуже різноманітна за своїми фізичними та хімічними властивостями (в'язкість, здатність до спінювання тощо), а тому під час дозування та фасування у споживчу тару повинні виконуватись відповідні умови, що гарантували б збереження специфічних властивостей тієї чи іншої продукції. Тому пристрої для дозування і фасування рідкої продукції різноманітні як за технологічними процесами, так і за конструктивними рішеннями.

Сьогодні рідку продукцію фасують у різні типи і види споживчої тари, виготовленої зі скла, полімерних матеріалів, металу, комбінованих матеріалів. Це сприяло створенню відповідної конструктивної гами фасувальних пристроїв. Для аналізу і визначення тенденцій вдосконалення конструктивних рішень цих пристроїв необхідно їх систематизувати за найбільш характерними ознаками. Саме тому все різноманіття дозувально – фасувальних пристроїв можна зобразити у вигляді класифікації (рис.1.7.)

Серед поданої класифікації можна виділити пристрої для надбарометричного фасування, який є одним із найскладнішим серед інших. Такий вид фасування застосовують для рідин, насичених діоксидом вуглецю (CO₂). Характерними представниками цієї групи рідин є: ігристі вина, квас,

пиво, мінеральні газовані напої. Фасування рідин, насичених (CO_2), потребує забезпечення умови утримання діоксиду вуглецю в розчиненому стані. До числа основних факторів, що забезпечують виконання такої умови, відносяться парціальний тиск (CO_2) системі «рідина-газ» та температура рідини. Розчинність діоксиду вуглецю відповідає закону Генрі. Отже, для забезпечення нормативних показників за вмістом (CO_2), слід дотримуватися певних значень тиску фасування та температури напою.

При використанні скляної тари тиск фасування напоїв обмежується міцністю пляшки і складає біля 0,18-0,2 МПа, йому відповідає температура 2-6 °С. І хоча більшість фасувальних автоматів дозволяє в роботі зі скляною тарою підвищувати тиск фасування до 0,6-0,7 МПа, ця можливість не використовується. Проте, у випадках фасування напоїв в пляшки з ПЕТФ тиск не обмежується, оскільки така тара витримує підвищення тиску до 1,5 МПа. Це дає можливість підвищувати температуру фасування напоїв до 10-12 °С і навіть до 16-18°С.

У використанні підвищених тисків існує ще одна перепона, пов'язана з різким виділенням (CO_2), і піноутворенням після розгерметизації пляшки по закінченні фасування. При цьому інерційні властивості піноутворення залежать від фізико-хімічних параметрів напоїв, а тому при обмеженому часі перебування пляшок в розгерметизованому стані на високопродуктивному обладнанні ці перепони долаються.

Поряд з формуванням надатмосферного тиску в тарі під час фасування напоїв, що не стійкі до контакту з киснем та залишковою мікрофлорою порожнини тари, потрібно попередньо обробляти тару вакуумуванням, інертними газами, іонізацією тощо. Все це досить суттєво ускладнює операцію фасування. Зовсім ще недавно формування дози продукції здійснювалось тільки за рівнем у споживчій тарі. На сьогодні з впровадженням нових систем вимірювання (магнітно-індуктивний, тензометричний) широке застосування знаходять такі способи формування дози, як потоковий та ваговий. Провідні німецькі Фірми KHS і Kronen

потоковий метод формування дози застосовують в універсальних високопродуктивних лініях фасування. Для здійснення надбарометричного процесу фасування рідин застосовують головним чином дві системи фасувальних пристроїв : одно- і трикамерну.

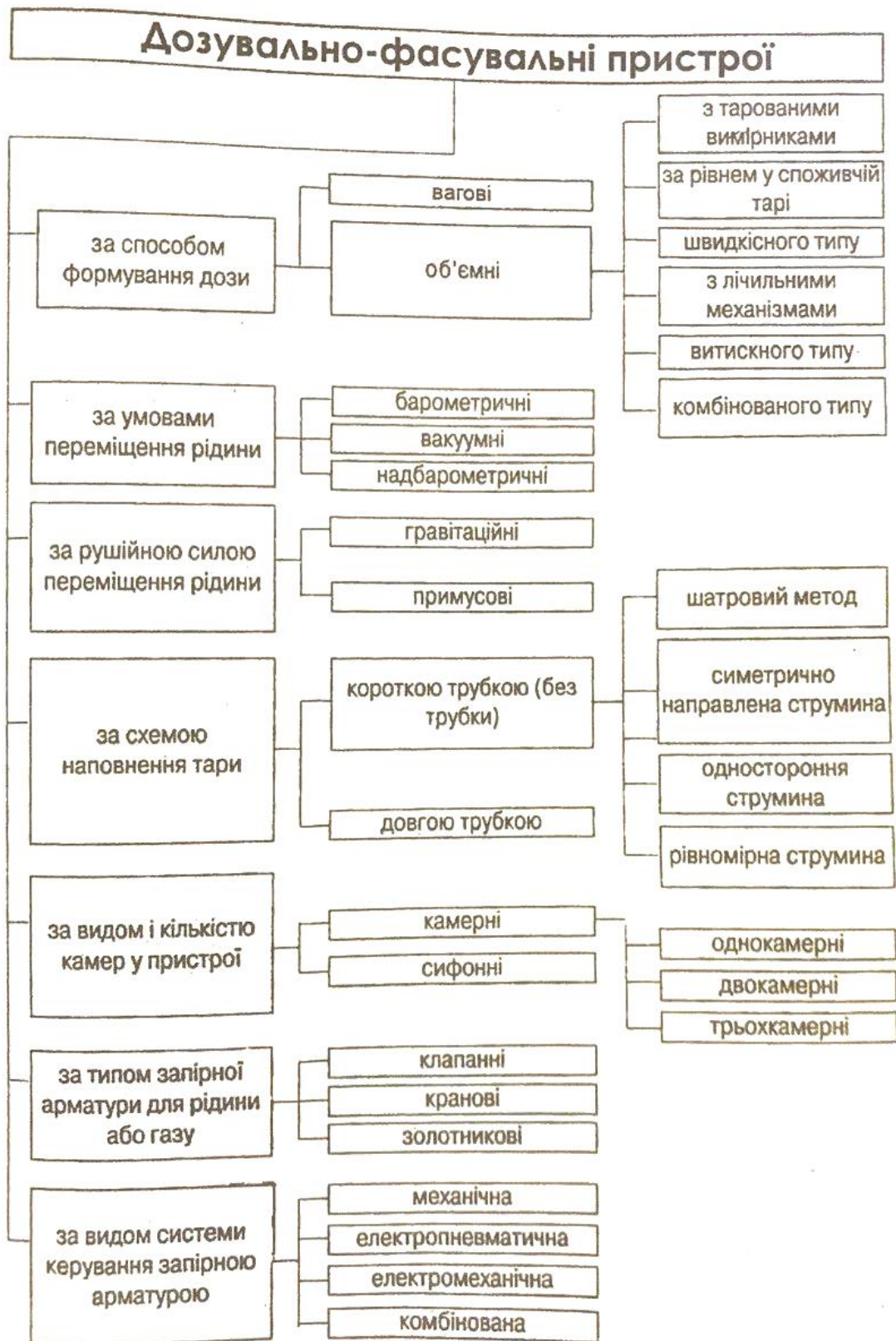


Рис.1.7. Класифікація дозувально-фасувальних пристроїв для рідкої харчової продукції

1.5.1. Характерні конструктивні схеми трикамерних фасувальних пристроїв

Прикладами трикамерної системи фасувального пристрою можуть бути пристрої машин P2-6; Innofill DR фірми KHS (рис.1.8.) ; Volumetric VO-DM.I Sensometric VPL фірми KRONES (Німеччина) та ін.

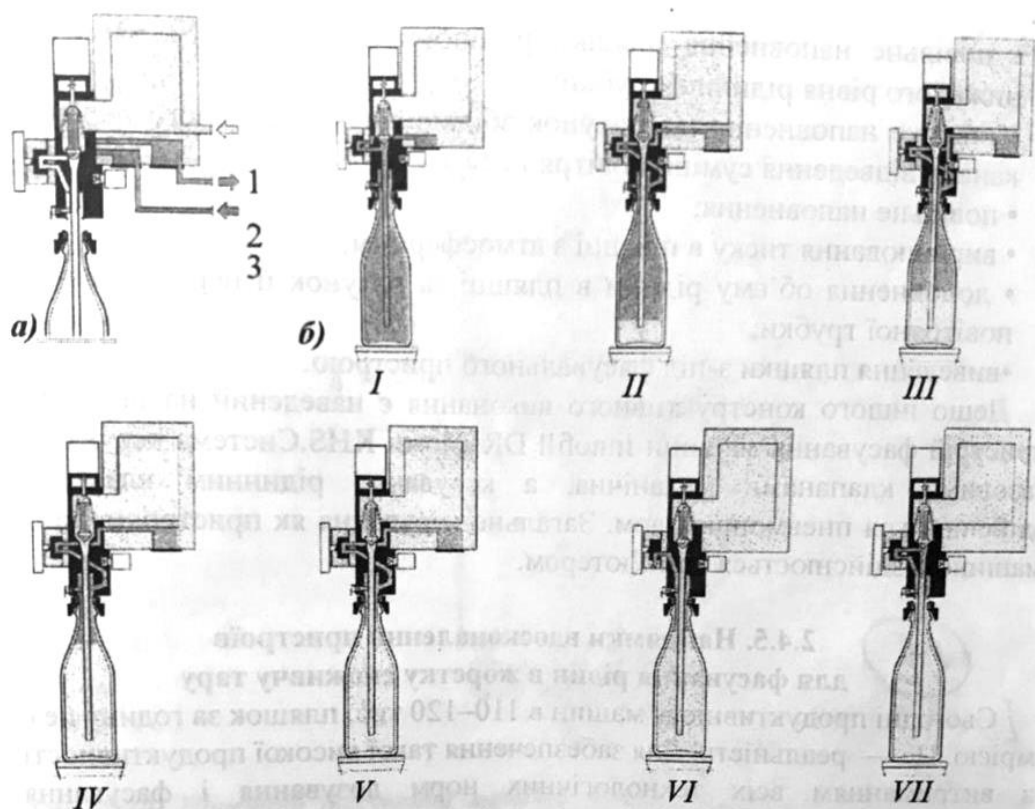


Рис. 1.8. Пристрій фасування Innofill DR: а - схема пристрою: 1 – канал подачі рідини; 2 – канал виведення суміші повітря і CO_2 із пляшки; 3 – канал подачі чистого CO_2 ; б – характерні етапи фасування : I – формування протитиску в пляшці чистим CO_2 ; II — повільне наповнення; III — наповнення; IV— завершальна фаза фасування; V – початок стабілізаційного періоду; VI – завершення стабілізаційного періоду і вирівнювання тиску в пляшці з атмосферою; VII – переміщення продукції із зливної трубки в пляшку;

Загалом процес наповнення пляшок рідиною може складатись із наступних етапів:

- подача пляшки до фасувального пристрою;
- вирівнювання тиску в пляшці і в рідинному резервуарі;

- повільне наповнення пляшки рідиною до рівня 8-10 мм вище нижнього рівня рідинної трубки;
- швидке наповнення (за рахунок збільшення поперечного перерізу каналу відведення суміші повітря і CO₂);
- повільне наповнення;
- вирівнювання тиску в пляшці з атмосферним;
- доповнення об'єму рідини в пляшці за рахунок її переміщення із повітряної трубки;
- виведення пляшки з-під фасувального пристрою.

На рис. 1.8. зображено пристрій фасування машини Innofill DR фірми KHS. Система керування газовими клапанами механічна, а керування рідинним клапаном здійснюється пневмоприводом. Загальне керування як пристроєм, так і машиною здійснюється комп'ютером.

1.5.2. Напрямки вдосконалення пристроїв для фасування рідин в жорстку споживчу тару

Сьогодні продуктивність машин в 110-120 тис. пляшок за годину не є мрією. Це – реальність. Для забезпечення такої високої продуктивності з витриманням всіх технологічних норм дозування і фасування потрібно впроваджувати нові технології формування дози, забезпечити централізоване керування роботою всіх робочих органів, клапанів, систем. Тобто основними напрямками вдосконалення цих пристроїв є: впровадження індуктивних і магніто-індуктивних витратомірів³; встановлення додаткових зондів на фасувальні трубки; заміна напрямних копіїв, що керують роботою кранів, клапанів на індивідуальні пневматичні або електромагнітні приводи; централізоване керування процесом дозування і фасування мікропроцесорною технікою; універсальність і гнучкість в переналагодженні на інший тип рідкої продукції, тобто на іншу систему фасування. Всі ці напрями вдосконалення в повній мірі представлені в реально діючих зразках

машин з різними системами фасування таких, наприклад, провідних фірм, як KRONES і KHS (Німеччина). Безумовно, ці напрями прослідковуються і в обладнанні італійських та французьких фірм, але вищенаведені фірми мають найбільшу гаму високопродуктивного обладнання.

1.5.3. Короткий огляд систем фасування фірми KRONES

Машини фірми KRONES фасують різні харчові рідини в скляну, металеву і полімерну (ПЕТФ) споживчу тару.

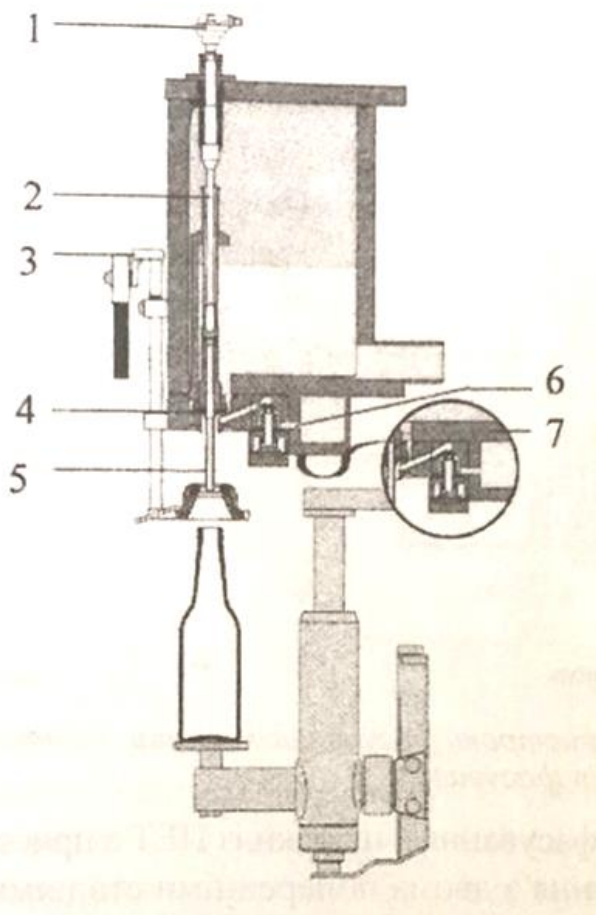


Рис. 1.9. Пристрій фасування машини Mecafill VKP: 1- керування роботою рідинного клапана; 2- трубка подачі газу; 3- ролик кулачкового механізму; 4— затвор для газу; 5- трубка відведення повітря 6— канал SIP; 7 — розвантажувальний вентиль ;

Машини випускаються таких серій:

- Mecafill VKP;
- Volumetik VO-DM-PET, VOC;
- Sensometric VPG, VPI, VPL;

- Isofill VG, VV;

Машини серії Mesafill VKP можуть фасувати як напої із вмістом CO₂ так і негазовані напої. Для цього в мікропроцесорі змінюється програма включення і виключення газових клапанів. Фасувальні пристрої цієї серії машин є однокамерними системами з короткою газовою трубкою. В пристрої встановлено механічний клапан з електропневматичним керуванням. Застосування електропневматичного керування роботою рідинного клапана дозволяє здійснювати фасування в кілька етапів з корегуванням точності рівня рідини в тарі. За потреби при відповідному спрацьовуванні клапанів може здійснюватись одинарне або подвійне вакуумування порожнини тари.

Існують різні модифікації цієї серії машин:

- VKP-базова модель для фасування газованих і негазованих напоїв в скляні пляшки (рис. 1.9);
- VKP-PET - для фасування в пляшки із ПЕТ з пристроєм Neck-Handling;
- VKPV — фасування з двома попередніми стадіями вакуумування;
- VPPV-CF - фасування з двома попередніми стадіями вакуумування і етапом корегування точності рівня рідини в пляшці.

Систему фасування Volumetric вважають найбільш прогресивною і такою, що буде відповідати вимогам завтрашнього дня. Ця система в залежності від тари, в яку фасується продукція, поділяється на Volumetric VODM-PET і Volumetric VOC. Система Volumetric VODM-PET призначена для фасування як газованих CO₂, напоїв, так негазованих напоїв у споживчу тару із ПЕТ. Процес формування дози здійснюється за допомогою індуктивного витратоміра і електронного керування електропневмоклапанами. Для продукції, що є чутливою до кисню і легко піниться, передбачено різні варіанти довжин фасувальних трубок, що забезпечують необхідні умови фасування. Поряд з цим фасування може здійснюватись як однокамерною, так і багатокамерною системами. Ця система фасування є також ідеальною для виконання холодного фасування в асептичних умовах. Для фасування

газованих напоїв в пляшки із ПЕТ в пристроях передбачено виконання додаткових операцій щодо попереднього ополіскування пляшок CO₂, і можливості вибору швидкості фасування: швидка і повільна.

1.5.4. Короткий огляд систем фасування фірми KHS

Не менш оригінальні принципи і конструктивні рішення мають пристрої фасування машин серій Innofill NR, UM, NM, DRS, DVD, DRV фірми KHS (Німеччина). Три останні серії із цього переліку є інноваційними.

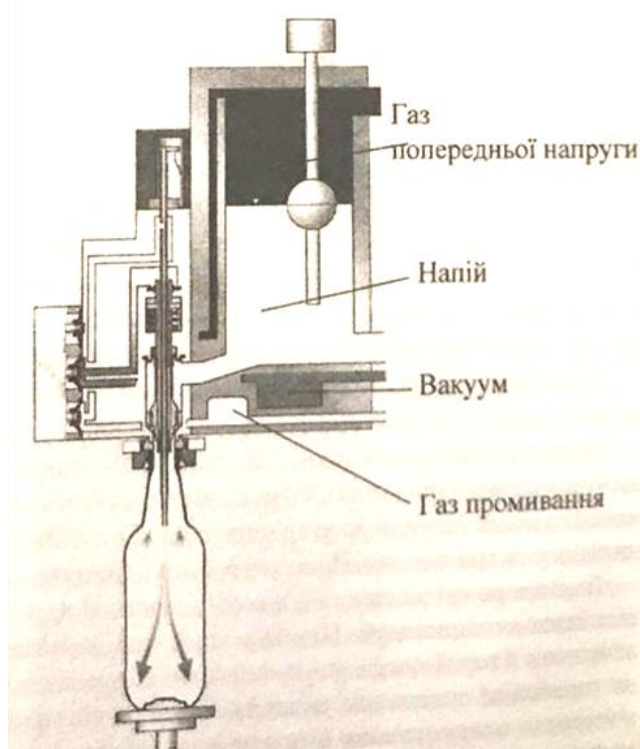


Рис.1.10. Схема пристрою фасування машини системи Innofill DRS

Так, система фасування Innofill DRS (рис. 1.10) дає можливість фасувати продукцію як в пляшки з ПЕТ, так і в скляні пляшки. Пристрої фасування цієї системи формують дозу продукції за її рівнем у споживчій тарі. При цьому рівень продукції контролюється зондом, встановленим на повітряній трубці пристрою. Переналадження машини фасування Innofill DRS для роботи зі скляною пляшкою на пляшки з ПЕТ здійснюється із сенсорного монітора. Для фасування продукції в скляні пляшки системою

передбачено багаторазове вакуумування з подальшим насиченням порожнини CO₂.

У випадку фасування продукції, що є особливо чутливою до кисню, у пляшки ПЕТ передбачено ополіскування порожнини пляшки інертним газом. Ця система забезпечує високу гнучкість і додаткові зручності в процесі фасування. Комп'ютер в заданих межах чітко керує роботою пневматичних кранів.

На один рідинний канал потрібно три мембранних циліндра керування каналами газу і один циліндр для відкриття і закриття рідинного клапана. Обмеження кількості рухомих елементів пристрою спрощує керування і технічне обслуговування машини.

Машини серії DRV дають можливість після незначних переналагоджувань (встановлення відповідної програми на комп'ютері) фасувати продукцію за п'ятьма технологіями:

- фасування негазованих напоїв без тиску;
- однокамерне фасування продукції під тиском;
- трикамерне фасування під тиском продукції, що є чутливою до кисню або мікрофлори;
- фасування пива у ПЕТ-пляшки однокамерним пристроєм;
- фасування пива у ПЕТ-пляшки трикамерним пристроєм;

Машини системи Innofill DVD (рис.1.11) призначенні для фасування продукції в банки. Пристрої фасування цих машин також мають в основі магнітно-індуктивний витратомір, що забезпечує високу точність формування дози. Процес фасування можна також навести сукупністю етапів. До початку фасування здійснюється газове промивання банки. Промивання виконується за допомогою CO₂, для витискання кисню з порожнини банки. Потім подається чистий газ CO₂, для створення протитиску і відкривається рідинний клапан. Керування рідинним і газовим клапанами здійснюється пневмоциліндром. Фасування здійснюється під

тиском. По завершенню фасування тиск в банці понижується до атмосферного.

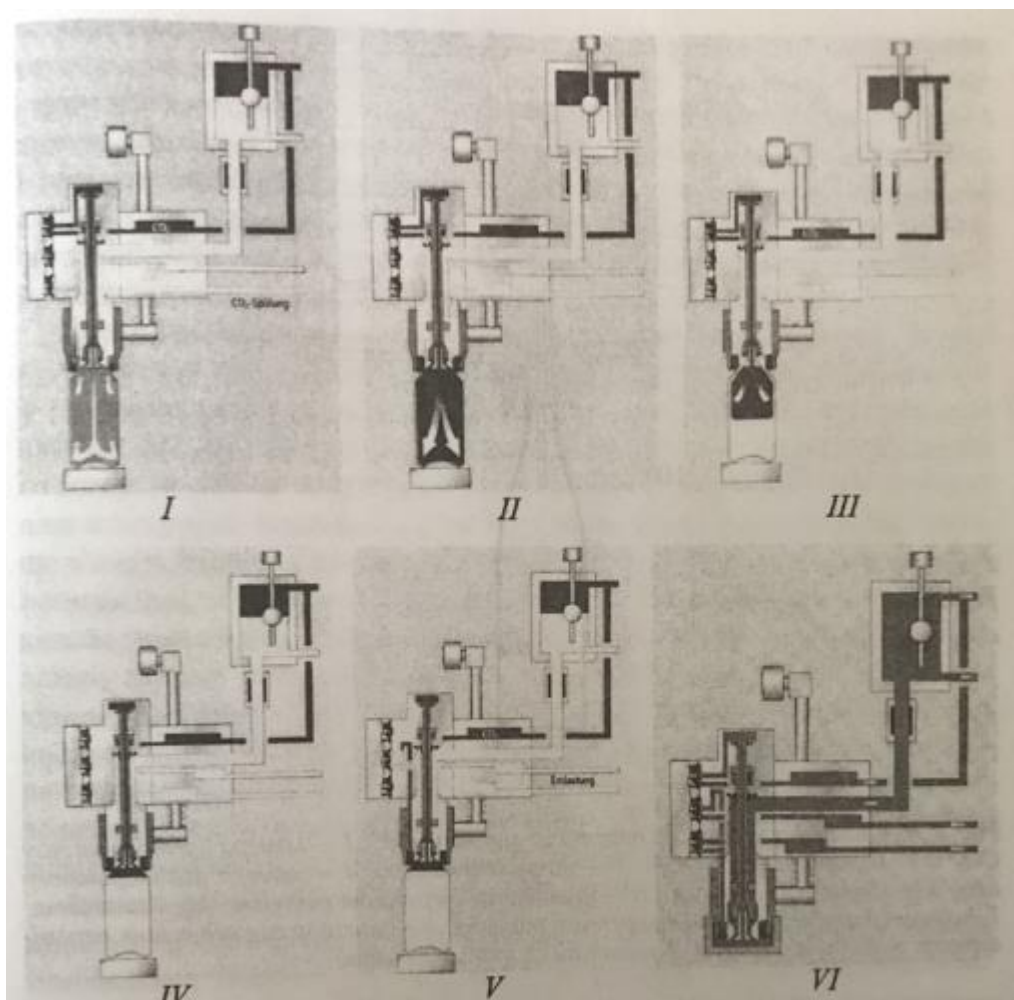


Рис.1.11 Схеми характерних етапів фасування продукції пристроєм машини Innofill DVD: I-промивання банки газом; II – формування надлишкового тиску в банці; III — фасування продукції; IV — звершення фасування продукції; V – декомпресія фасованої продукції ; VI – очищення системи;

Газ виходить через декомпресійний канал. За рахунок керування тиском декомпресії мінімізується рівень спінювання продукції. Переналадження пристрою фасування на іншу величину дози продукції здійснюється за рахунок введення в дію наступної програми. Технологія фасування рідин із подвійним об'ємним ополіскуванням внутрішньої порожнини тари газом CO₂, реалізована в системі машин ZMS. На рис. 1.12 наведена схема

фасувального пристрою машини ZMS, призначеної для фасування рідин у скляні пляшки. Принцип роботи пристрою полягає в наступному.

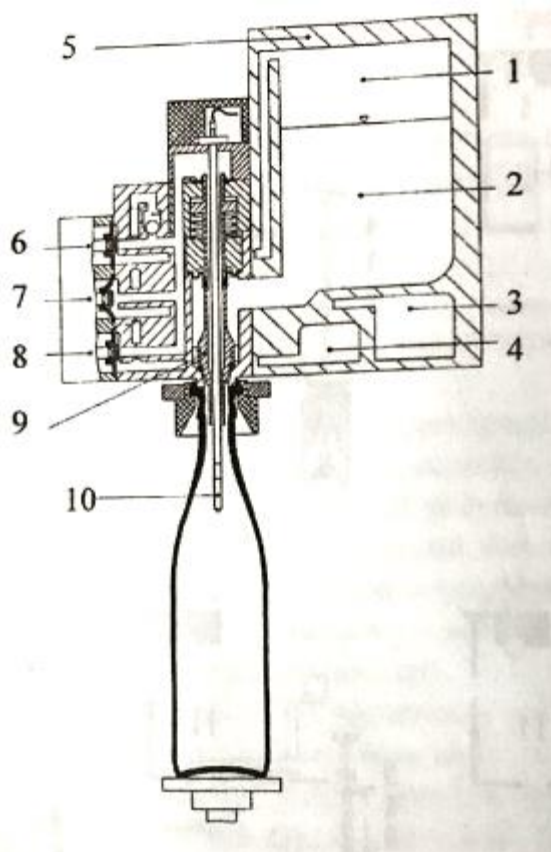


Рис. 1.12. Схема фасувального пристрою машини ZMS: 1 – камера нагнітання газу CO_2 ; 2— камера для продукції; 3 – вакуумна камера; 4 – камера для зворотнього газу; 5 — кільцевий резервуар; 6 – циліндр для керування подачею газу нагнітання; 7- циліндр для керуванням створенням вакууму; 8— циліндр для керування переміщенням зворотного газу; 9 — рідинний клапан; 10 - зонд;

Пляшка розподільною зірочкою подається на горизонтальну площину піднімального циліндра. Піднімальний циліндр піднімає пляшку доверху впираючи її горловину в ущільнювальні елементи конуса. Після притискання горловини пляшки до ущільнювального елемента конуса здійснюється попереднє вакуумування її внутрішньої порожнини. Циліндр 7 відкриває канал між вакуумною камерою 3 і порожниною пляшки. За рахунок цього в пляшці утворюється вакуум. Тривалість вакуумування може регулюватись із центрального пульта керування. Після закриття циліндром 7 вакуумного каналу циліндр 8 відкриває канал для переміщення в пляшку зворотного газу

CO₂, з каналу 4. Через цей канал здійснюється газове промивання внутрішньої порожнини пляшки газом CO₂. По завершенню газового ополіскування пляшки циліндр 8 закриває газовий канал, а циліндр 7 знову відкриває канал, що з'єднує порожнину пляшки з вакуумним каналом. Здійснюється друге вакуумування. Потім виконується ще одне ополіскування порожнини пляшки газом CO₂, з камери 4 і завершальне її вакуумування.

1.5.5. Особливості конструктивних виконань пристроїв фасування в машинах з лінійним компонуванням

Машини для фасування рідкої продукції в пляшки за лінійним компонуванням основних функціональних модулів здебільшого призначені для забезпечення малої і середньої продуктивності. У таких машинах дозувальні пристрої розташовані вздовж напрямної або конвеєра, по якому подаються пляшки. В залежності від ступеня автоматизації машини, керування дозатором може виконуватись як вручну, так і автоматично. Формування дози може здійснюватись як за об'ємом у мірній ємності, так і за рівнем у споживчій тарі, а також за масою. Останні із перерахованих способів дозування широко використовується фірмою Grandall International в машинах моделей KN, BN і DN для фасування в'язких і пінливих рідин.

Фасування за масою здійснюється на базі керованих мікропроцесором електронних дозувальних ваг, що забезпечують високу точність дозування за рахунок застосування швидкої і повільної фази автоматичного фасування. Електронні контролери можна під'єднувати до принтера і комп'ютера для реєстрування ваги.

Продуктивність машин для фасування в ємності 0,5-1,0 л складає від 600 до 2500 доз/год.

Оригінальними і досить простими системами фасування різних за властивостями рідин є Servo/Fill (фасування за часом) і Net/Mass (фасування за масою). Ці системи розроблено фірмою Oden Corporation (США) для машин з лінійним компонуванням дозаторів.

Робота системи дозування Servo/Fill базується на застосуванні прецизійних шестерінчастих pomp з електронним керуванням (рис. 1.13)

Помпа механічно з'єднана із серводвигуном постійного струму. На другому кінці валу серводвигуна встановлено кодувальний пристрій, який формує прямокутні імпульси зі швидкістю, пропорційною швидкості обертання кодувального пристрою.

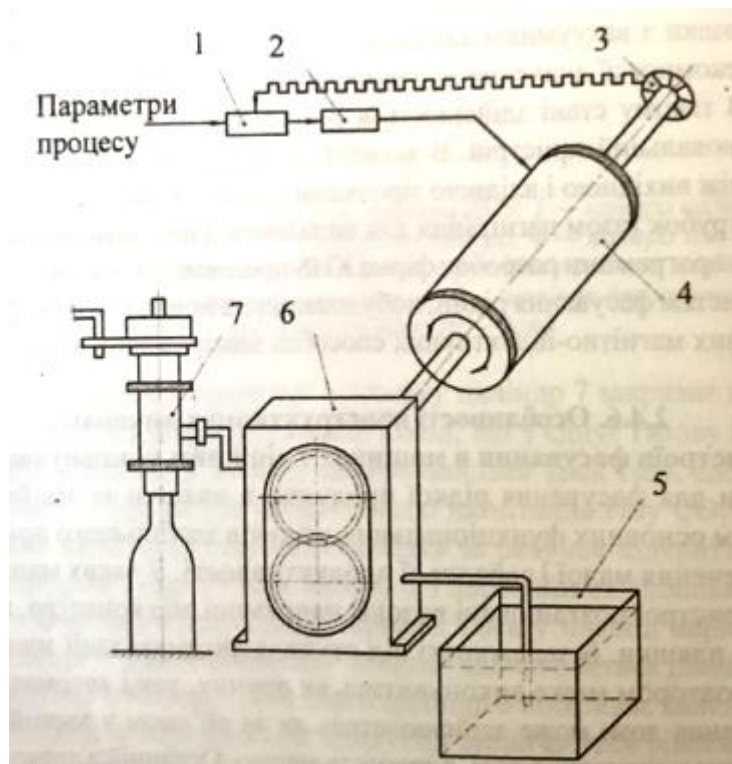


Рис.1.13. Характерна схема системи фасування рідин за часом Servo/Fill (США): 1- центральний процесор; 2 — блок керування серводвигуном; 3- кодувальний пристрій; 4— серводвигун; 5 – резервуар з продукцією; 6- шестерінчаста помпа; 7 – дозувально-фасувальний пристрій;

Ці імпульси поступають на блок керування, що контролює швидкість обертання валу серводвигуна і керує роботою клапана подачі або відсікання продукції в дозувальний пристрій. Доза продукції встановлюється кількістю обертів серводвигуна і відповідно шестерінчастої помпи. Система фасування Servo/Fill керується центральним процесором, в який вводяться всі необхідні вихідні дані, що характеризують параметри дозування (об'єм дози, швидкість потоку продукції, час спрацювання клапана відсікання). Це дає можливість

обертати ротор серводвигуна всього на кілька градусів, що забезпечує прецизійну точність дози навіть величиною в 1,0 мл.

Керований привід забезпечує частоту обертання шестерінок помпи до 500 об./хв, що створює потік рідини до 225 л/хв. Для миттєвого переключення системи на інші види рідин і тари в мікропроцесорі закладено 50 програм. Це дає можливість здійснювати фасування різних видів рідин з різною величиною дози.

Здебільшого в машинах встановлюється від 4 до 10 дозувальних пристроїв, які можуть забезпечувати продуктивність до 200 тис. доз/год.

Прикладом реалізації системи фасування рідин за рівнем, яка досить широко застосовується в машинах з лінійним компонованням дозаторів виробництв країн СНД, Болгарії, Польщі, Італії, є наведена на рис. 1.14 схема.

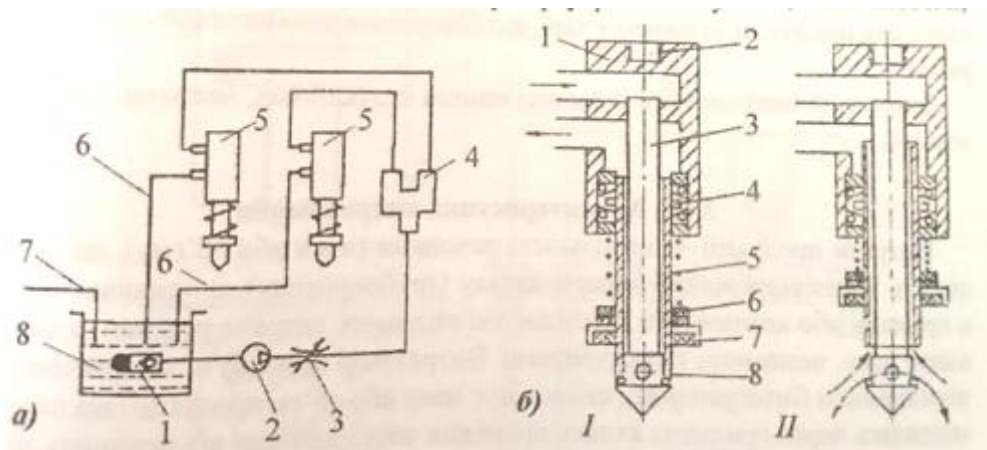


Рис. 1.14. Схема фасування рідин, де доза формується за рівнем у тарі: а – схема подачі продукту (1— зворотний клапан; 2 — помпа; 3 – шатровий кран; 4 – трійник; 5 - фасувальний пристрій; 6— система комунікацій; 7- труба для заповнення резервуара продукцією, 8— резервуар); б — фасувальний пристрій (1—корпус; 2 – місце кріплення штока пневмоциліндра; 3,8 – трубки; 4 – ущільнення; 5 – пружина; 6 – прокладка; 7 – ущільнення для горловини пляшки);

За даною системою продукція з резервуару подається помпою через зворотний клапан, шатровий кран – до фасувального пристрою через

трійник. Надлишок продукції зливається в резервуар по комунікаційній системі, а заповнення резервуара продукцією – через трубку 7 (Рис.1.14, а).

На рис. 1.14, б наведено два положення клапана фасувального пристрою: закрите I та відкрите II.

Рівень рідини у пляшці регулюється товщиною і кількістю прокладок 6. Після наповнення пляшки надлишок продукції зливається в резервуар 8 (рис. 1.14, а).

Розробники даного типу обладнання постійно вдосконалюють як системи фасування, так і конструктивні схеми дозувальних пристроїв. Так, за останні роки спеціалістами інституту проблем керування ім. В.А.

Трапезнікова (Росія) запатентовані дві типові схеми фасування, що різняться методами формування дози. Перша – одноканальна система фасування з відмірюванням дози у часі. Ця система призначена для об'ємного фасування рідин, що не піняться, малої, середньої і великої в'язкості. У системі реалізований принцип напірного переміщення рідини із замкненого витратного резервуару під дією постійного гідростатичного перепаду тиску в системі фасування з вимірюванням дози в часі. Це дає можливість підтримувати в системі фасування витрати продукції з високою точністю. Тобто здійснюється дозування за побічними параметрами (час відкриття зливного клапана).

Друга - двоканальна система фасування з відмірюванням дози за рівнем у споживчій тарі. Ця система призначена для фасування рідин малої і середньої в'язкості (в тому числі і пінливих рідин). В системі реалізовано принцип вільного або напірного (під дією надлишкового тиску стисненого повітря) переміщення рідин в тару з витратного резервуару з відмірюванням дози продукції за рівнем тарі, що фіксується пневматичним датчиком рівня.

Існують й інші системи із застосуванням індукційних, частотних витратомірів.

1.5.6 Характеристика промислових витратомірів

Витрати продукції – це кількість речовини (маси або об'єму), що проходить через відповідний переріз каналу (трубопроводу) за одиницю часу, а прилади або компоненти приладів, які визнають витрати речовин за одиницю часу, називають витратомірами. Витратомір може бути забезпечений лічильником (інтегратором), що показує масу або об'єм продукції, яка перемістилась через прилад за якийсь проміжок часу. Залежно від принципу дії, витратоміри, що найчастіше застосовуються в промисловості, поділяють на такі групи: постійного і змінного перепаду тиску, тахометричні, електромагнітні і ультразвукові.

У пакувальному обладнанні широкого застосування знайшли тахометричні, електромагнітні і ультразвукові витратоміри. Тахометричні витратоміри застосовуються з різного типу лічильниками, що забезпечують задані витрати продукції і точність дозування.

До основних типів лічильників можна віднести: турбінні, кулькові, камерні, шестерінчасті.

Принцип дії турбінних лічильників базується на вимірюванні числа обертів турбіни (крильчатки), що обертається зі швидкістю, пропорційною витратам рідини, яка переміщається в трубопроводі. За конструктивним виконанням їх можна поділити на дві основні групи: крильчасті (з тангенційним підведенням потоку продукції), в яких вісь обертання крильчатки перпендикулярна напрямку руху рідини, і турбінні (з аксіальним підведенням потоку продукції), в яких вісь обертання турбіни паралельна напрямку руху потоку рідини. Перша група лічильників застосовується для вимірювання малих, а друга – великих витрат продукції.

Крильчасті і турбінні витратоміри складаються з однакових за призначенням вузлів і мають однакову кінематичну схему. Обертання осі крильчатки (турбінки) через редуктор і магнітну муфту передається на лічильний механізм, який визначає витрати продукції, що перемістилась через трубу.

Кульковими називають витратоміри тому, що чутливим елементом є кулька, що безперервно рухається в одній площині по внутрішній поверхні трубки під дією попередньо закрученого потоку. Структурна схема витратоміра включає: первинний перетворювач витрат продукції і вимірювальний прилад.

Камерні витратоміри базуються на залежності між витратами і висотою рівня рідини у ємності, через яку безпосередньо протікає рідина. Застосовуються такі витратоміри здебільшого для визначення витрат агресивних рідин, а також рідин, що мають тверді зважені частинки.

Витратоміри з **лічильниками** у вигляді овальних шестерінок широко застосовуються у різних галузях народного господарства. Принцип дії таких лічильників базується на відрахуванні відповідних об'ємів рідкої продукції, що проходить через вимірювальну камеру під час обертання овальних шестерінок. Потік продукції надходить до лічильника через вхідний патрубок і, перемістив на створення крутного моменту, що приводить овальні шестерінки в рух. Залежно від положення шестерінок кожна з них по чергово є то ведучою, то веденою. Вимірювання кількості рідини здійснюється за рахунок періодичного відсікання відповідних її об'ємів, розташованих в порожнинах між циліндричною поверхнею корпуса пристрою і овальними шестерінками.

Електромагнітні (індукційні) витратоміри складаються з первинного перетворювача витрат продукції і вимірювального пристрою або передавального перетворювача. Первинний перетворювач (датчик) – це ділянка труби 1 (рис.1.16.) виготовлена з немагнітного матеріалу (сталь 12Х18Н10Т), розташована між полюсами 2 електромагніта. Магнітне поле електромагніта направлено перпендикулярно до напрямку потоку рідини. Із середини труба покрита ізоляційним матеріалом. Рідина під час переміщення по даній ділянці труби перетинає силові лінії магнітного поля.

При цьому в рідині, як в рухомому провіднику, індукується ЕРС, величина якої пропорційна середній швидкості потоку, тобто об'ємним витратам рідини. Індукувальна ЕРС знімається двома електродами 3, введеними діаметрально в поперечний переріз трубопроводу, підсилюється і вимірюється вторинним приладом.

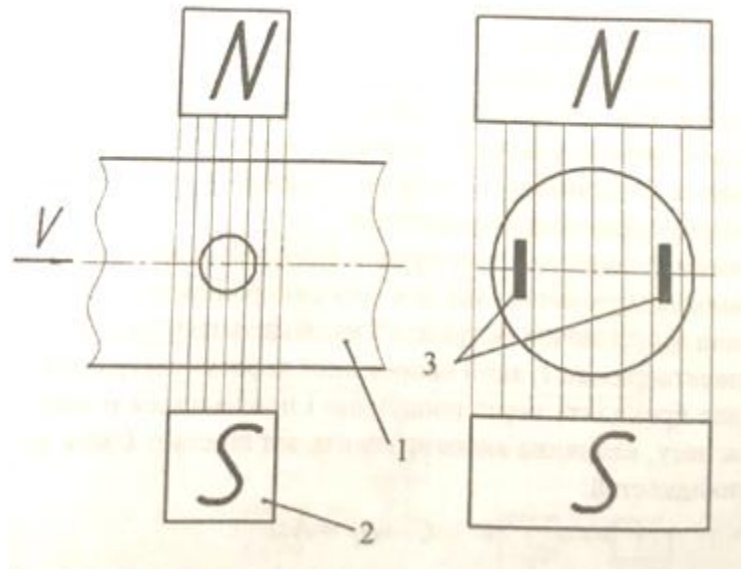


Рис.1.15. Принципова схема електромагнітного витратоміра: 1 – трубопровід; 2 – магніт або електромагніт; 3 – електроди;

Для зменшення чутливості приладу до викривлення осьової симетрії розподілення швидкості потоку і зменшення довжини вимірювальної ділянки трубопроводу магнітне поле виконується не постійним, а за спеціальним законом. Типова конструкція такого витратоміра зображена на рис.1.17.

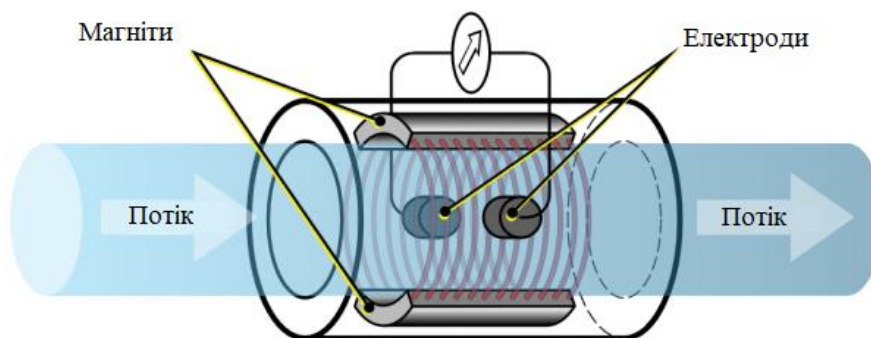


Рис.1.16. Типова конструкція електромагнітного витратоміра

Ультразвукові витратоміри мають велику швидкодію, перешкодостійкість, високу точність і великий діапазон вимірювань. Принцип роботи приладу базується на змінненні значення швидкості розповсюдження ультразвукового сигналу в рухомому середовищі залежно від значення складових швидкості цієї рідини в напрямку розповсюдження ультразвукового сигналу.

До складу витратоміру входять вимірювально-керуючий прилад і два п'єзодатчики. Первинним перетворювачем ультразвукового витратоміра є відрізок труби, на якому під кутом до її осі встановлено два п'єзотричні датчики. При стисканні і розтягуванні у відповідних напрямках п'єзоелементів на їх поверхнях виникають електричні заряди. Якщо до цих поверхонь прикласти різницю електричних потенціалів, то п'єзоелементи розтягуються або стискаються залежно від того, на якій з цих поверхонь буде більше напруження.

Це явище називають зворотним п'єзо ефектом і воно є основою роботи випромінювачів ультразвукових коливань, перетворюючи змінне електричне напруження в механічні коливання тієї ж частоти. Приймачі, перетворюючи ці коливання в змінне електричне напруження, працюють на прямому п'єзо ефекті. Кожний із двох п'єзоелементів по черзі є випромінювачами і приймачами.

Висновки до розділу №1

1. Сучасні тенденції розвитку промисловості вимагають максимально ефективної експлуатації обладнання, високої мобільності виробництв та якості виробленої продукції, що успішно забезпечується високопродуктивними мехатронними системами.
2. Використання принципу агрегатно-модульного проектування в сучасних лініях для дозування та фасування рідкої харчової продукції підтверджує його виняткову ефективність.
3. Існує необхідність в організації підготовки «мехатронно-орієнтованих» інженерів та менеджерів, здатних здійснювати системну інтеграцію і керівництво роботою вузько профільованих фахівців різної кваліфікації.
4. Широке використання механіки, електрики та ПЛК вимагає від спеціалістів напрямку мехатроніка не тільки функціонального розуміння властивостей мехатронних модулів, і поглиблених знань з пневматики, гідравліки, механіки, електромеханіки, мікропроцесорної техніки, принципу роботи електронних вимірювальних приладів та вміння працювати із найрізноманітнішими ПЛК та поєднувати такі ПЛК в комплексні мережі.

Постановка задачі дослідження:

Дослідивши структуру сучасних мехатронних комплексів та сучасних систем дозування рідкої харчової продукції, визначимо задачу подальших досліджень, а саме:

Провести експериментальні дослідження мехатронної гідравлічної установки **Festo EduKit PA Advanced** з метою визначення рівнянь напірної характеристики трубопровідної мережі, а також статичної характеристики насосної станції.

Провести експериментальні дослідження гідравлічної мехатронної системи за допомогою багатофакторного експерименту із використанням **EasyPort** інтерфейсу та середовища **FluidLab-PA process** з метою визначити витратну характеристику гідравлічної системи.

Провести експериментальні дослідження коливання рівня рідини у витратному резервуарі, а також енергетичних витрат насосної станції в процесі дозування рідкої харчової продукції із використанням ПЛК **Siemens S7-1500** та панелі людино-машинного інтерфейсу **KTP400 comfort**.

Розділ 2. Опис дослідної установки

2.1 Конструкція та принцип роботи дослідної установки

Для експериментальних досліджень роботи мехатронної системи подачі продукту було використано дослідну установку **Festo EduKit PA Advanced** загальний вигляд якої показано на рис.2.1.

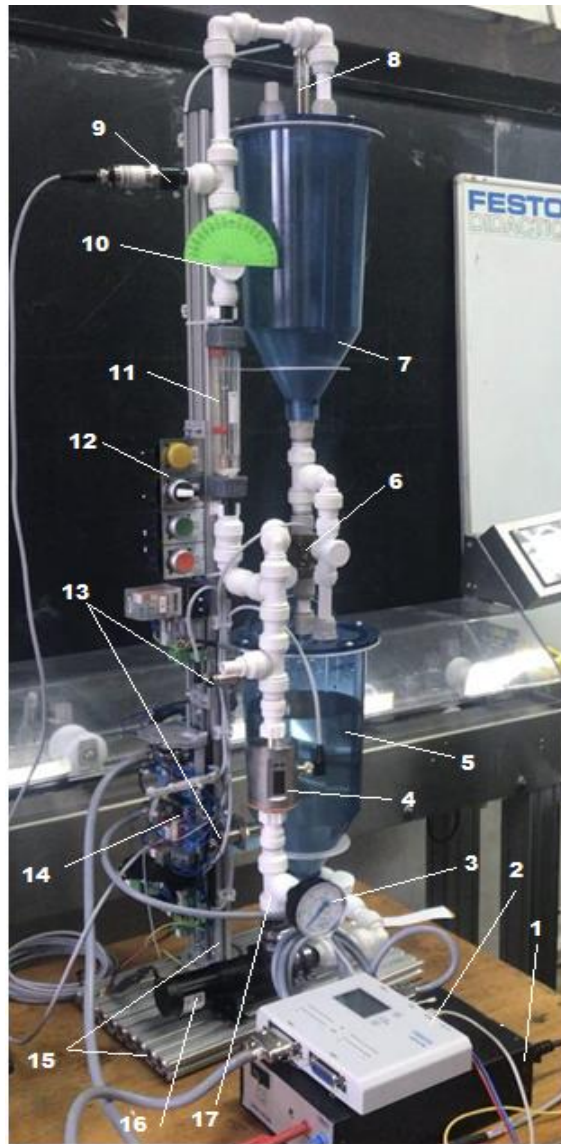


Рис.2.1 Festo EduKit PA Advanced:

1 – блок живлення; 2 – EasyPort USB інтерфейс; 3 – манометр; 4 – витратомір; 5 – нижній резервуар; 6 – електромагнітний клапан; 7 – верхній резервуар; 8 – ультразвуковий датчик рівня; 9 – датчик тиску; 10 – запірна арматура; 11 – ротаметр; 12 – блок управління; 13 – дискретні датчики рівня; 14 – I/O блок; 15 – станина; 16 – насосна станція; 17 – трубопровід;

Дана експериментальна установка представляє собою замкнуту мехатронну гідравлічну систему. Конструкція системи складається з трубопроводів 17, що сполучають між собою два резервуари, верхній (7) та нижній (5), між якими знаходиться електромагнітний клапан (6).

Для перекачування рідини в системі використовується насосна станція (16) з двигуном постійного струму, який змонтовано на станині (15) та підключено до блоку входів-виходів (14).

Для відслідковування технологічних параметрів системи в режимі реального часу, мехатронний модуль оснащено системою зворотніх зв'язків у вигляді дискретних (13) та аналогових датчиків (4, 9), а також контрольного манометра (3) та ротаметра (11).

Управління експериментальною установкою здійснюється в ручному режимі за допомогою кнопочної станції (12), а також за допомогою EasyPort USB інтерфейсу (2), що з'єднується з програмним забезпеченням ПК. Для живлення всієї установки використовується блок живлення постійного струму (1). Загальні технічні характеристики даної системи представлено у вигляді таблиці 2.1.

2.2 Монтаж та схема підключення основних компонентів системи

Для роботи мехатронного модуля була розроблена технологічна схема подачі рідкого харчового продукту (рис.2.3.). Підключення всіх елементів системи між собою здійснювалось через пластикову композитну трубу та відповідні перехідні елементи: трійники, коліна та заглушки компанії *JohnGuest*.

Функцію з'єднання та герметизації гідравлічних елементів системи виконує цангове з'єднання трубопроводів, принципова схема якого показана на рис.2.2.

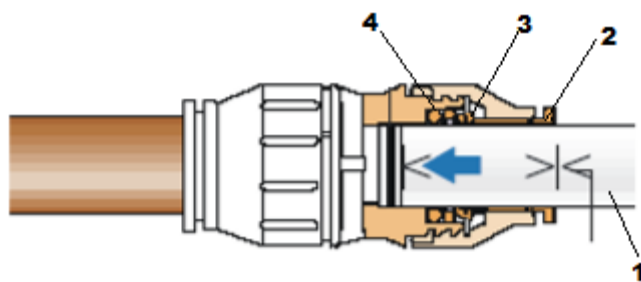


Рис.2.2 Схема цангового з'єднання трубопроводів JG: 1 – пластикова труба; 2 – цанга; 3 – зубці; 4 – ущільнююче кільце;

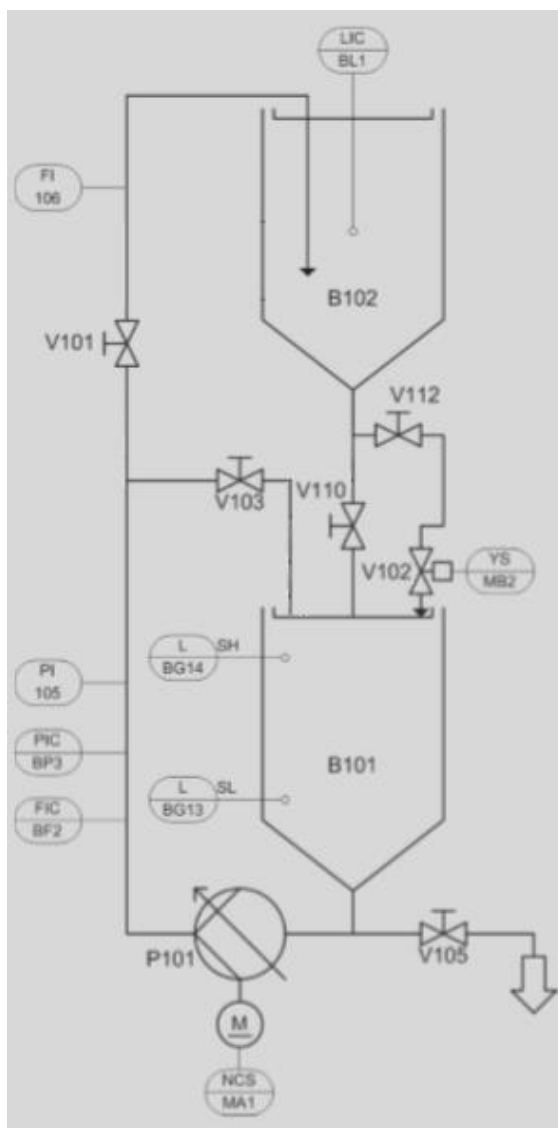


Рис.2.3 Технологічна схема установки Festo EduKit PA Advanced :
 V101,V103,105,V110,V112-запірна арматура; V102 – електромагнітний клапан; PIC - аналоговий датчик тиску; FIC - аналоговий датчик витрат; LIC - аналоговий датчик рівня; L SH-дискретний датчик верхнього рівня; L SL-дискретний датчик нижнього рівня; PI105 –манометр; FI106 –ротаметр; B102 – верхній резервуар; B101 – нижній резервуар;

Для монтажу електричних, гідравлічних та механічних компонентів установки було використано горизонтальну алюмінієву профільну плиту (рис.2.4 поз.3) розмірами 20x200x350мм на яку під кутом 90 градусів встановлюється коротка (2), та довга (3) профільні стійки, які з'єднуються за допомогою з'єднувальних пластин (4).

Таблиця 2.1

Технічні характеристики системи трубопроводів

Характеристики	Значення
Умови експлуатації:	
- Холодна вода	20°C/10бар
- Гаряча вода	65°C/7бар
Тиск системи	Мах. 80°C/6бар
Матеріал	Пластик РЕ
Зовнішній діаметр труби	D _з =15мм
Тиск розриву	20°C/40бар
Межа міцності з'єднання	20°C/1200Н

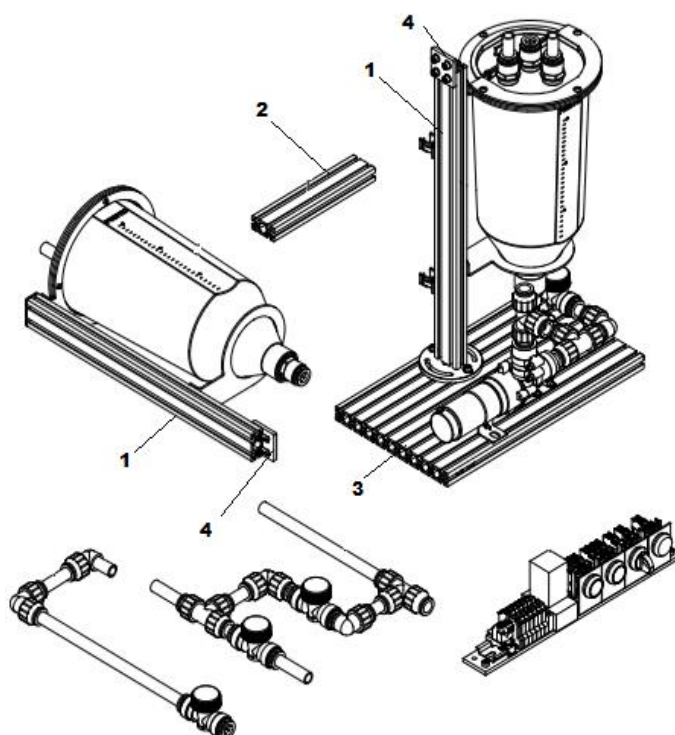


Рис. 2.4. Схема монтажу основних елементів системи:
1,2 – профільні стійки; 3 – профільна монтажна плита; 4 – з'єднувальні пластини;

Центральним елементом експериментальної установки є два резервуари (рис.2.5) між якими відбувається циркуляція рідини. Нижній – основний, в який попередньо заливається рідина, та верхній – в який рідина переміщується за допомогою відцентрового насосу.

При цьому, відповідно до схеми на рис.2.3, можливе два варіанта циркуляції рідкого харчового продукту в системі:

- а) по великому колу, коли запірна арматура V101 – відкрита і одночасно V103 – закрита;
- б) по малому колу, коли запірна арматура V101 – закрита і одночасно V103 – відкрита;

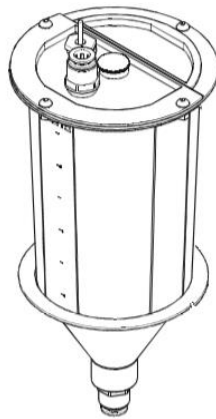


Рис.2.5 Резервуари B101,B102

Таблиця 2.2

Технічні характеристики резервуарів B101, B102

Характеристики	Значення
Допустима температура експлуатації	+65°C
Ємність резервуару - максимальна - ефективна - шкала	$V_{\max} = 4\text{л.}$ $V = 3\text{л.}$ $V_s = 0,5\text{--}3\text{л.}$
Матеріал	Macrolon 2805
Приєднувальний діаметр труби	$D = 15\text{мм.}$
Висота резервуару	$H = 300\text{мм.}$

2.3 Робочі органи дослідної установки

Регулювання режиму протікання рідини відбувалось в ручному режимі – через запірну арматуру шарового типу (рис.2.6 поз.2), або автоматичному, за допомогою нормально-закритого електромагнітного клапана поз.1.



Рис.2.6 Вузол з'єднання двох ємностей: 1 – електромагнітна запірна арматура; 2 – запірна арматура шарового типу;

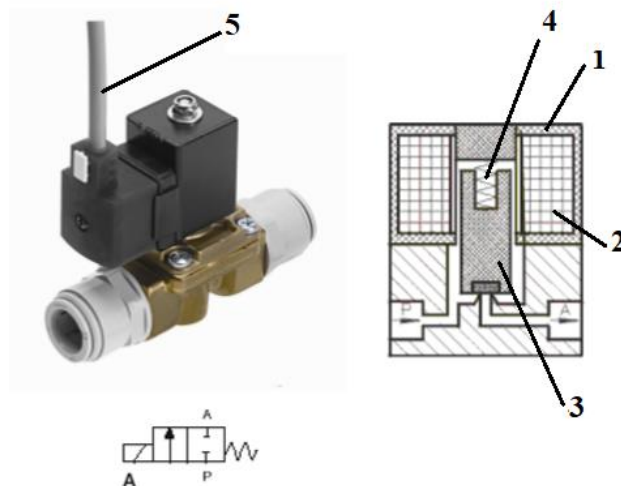


Рис.2.7 Загальний вигляд та принципова схема електромагнітного клапана: 1 – корпус; 2 – котушка індуктивності; 3 – шток; 4 – пружина; 5 – кабель живлення;

Конструкція електромагнітного клапану представлено на рис.2.7 ,який складається із котушки індуктивності поз.2 всередині якої знаходиться феромагнітний шток поз.3 та пружина поз.4, що монтується всередині корпусу поз.1.

В початковому положенні пружина підтискає шток до перепускного отвору, тим самим унеможливує протікання рідини через клапан, для відкриття клапану необхідно, аби через котушку індуктивності поз.2 пройшов струм, який проходить через провідник поз.5.

Таблиця 2.3

Технічні характеристики електромагнітного клапану

Характеристики	Значення
Енергетична потужність	8Вт
Кінематична в'язкість рідини	max. 21мм ² /с .
Циклічність роботи	max. 360/хв.
Напруга живлення	24В±10%
Матеріал корпусу	Латунь
Матеріал штока	Нержавіюча сталь
Клас захисту	IP54

Центральним елементом будь-якої гідравлічної системи в якій відбувається переміщення рідини є насосна станція, яка перетворює електричну енергію в механічну енергію руху рідини. Конструктивно, у будь-якій насосній станції можна виділити два основних вузла. Перший – це приводний вузол, який відповідає за створення крутного моменту на валу двигуна, другий – це корпус насосу із його робочими елементами: робоче колесо з лопатями, всмоктуючий і нагнітаючий патрубки.

У якості насосної станції в дослідній установці Festo EduKit PA Advanced використовується відцентровий насос *SPX Johnson Circulating*

pump 24V з приводом на основі двигуна постійного струму конструкцію якого показано на рис.2.8..

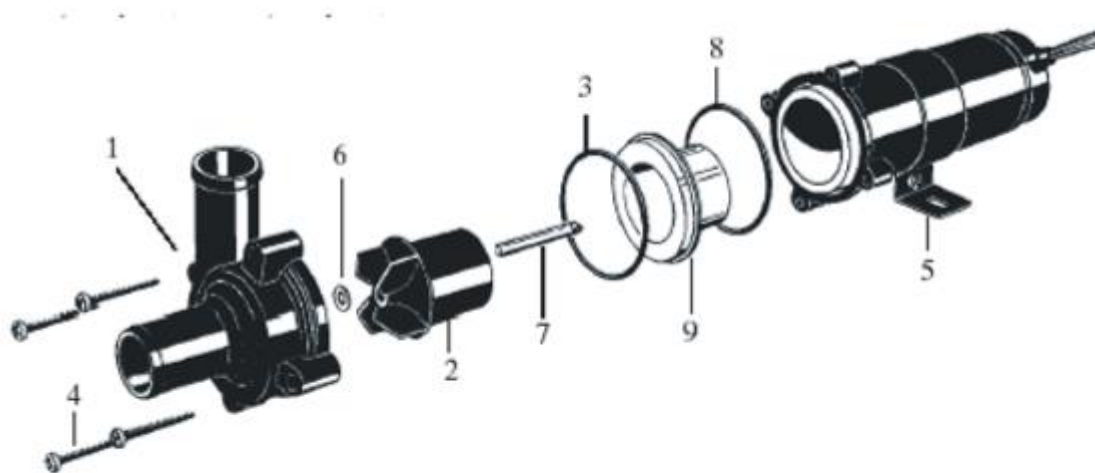


Рис.2.8 Насосна станція *SPX Johnson Circulating pump 24V*: 1 – корпус; 2 – лопатеве колесо; 3 – кільце; 4 – гвинти; 5 – опора; 6 – шайба; 7 – вал; 8 – ущільнююче кільце; 9 – магнітний корпус;

Таблиця 2.4

Технічні характеристики насосної станції
SPX Johnson Circulating pump 24V

Характеристики	Значення
Потужність	26Вт
Максимальний тиск	2,5бар.
Максимальна витрата	10л./хв.
Напруга живлення	12/24В
Температурні режими - рідина - середовище	-40 /+100 °С -40 /+70 °С
Діаметр вхідного/вихідного патрубків	d=15мм.
Ступінь захисту	IP67

2.4 Вимірювальні прилади

2.4.1 Електронні давачі сигналів

Основними вимірювальними приладами в даній експериментальній установці є аналогові датчики : тиску, витрат в системі та рівню рідини в резервуарі, а також дискретні датчики рівня. Додатково для контрольних вимірювань є манометр та ротаметр, що дають змогу порівняти результати вимірів електронних датчиків з контрольними вимірами.

Датчик тиску

Для вимірювання тиску в системі, використовується датчик тиску *BDSensors 26.600G* (рис.2.9) на основі кераміко-чутливого елементу, який складається з перехідного патрубку поз.1 в який, за допомогою нарізі вкручується датчик поз.2, для підключення аналогового датчика тиску використовується чотирьохпіновий роз'єм поз.3.



Рис.2.9 Аналоговий датчик тиску *BDSensors 26.600G*: 1 – перехідний патрубок; 2 – корпус датчика; 3 – роз'єм 4-х піновий;

Технічні характеристики датчику та схему підключення до аналогового блоку входів/виходів показано в табл.2.5 та рис.2.10 відповідно.

Таблиця 2.5

Технічні х-ки датчика *BDSensors 26.600G*

Характеристики	Значення
Вимірювана величина	Відносний тиск
Межі вимірювання	0 – 400мбар
Клас захисту	IP65
Напруга живлення	24В
Вихідний сигнал	12В
Чутливий елемент	Керамічна пластина
Час відгуку	<3мс.

Parameter	wire colour	Value
3-wire technology (0..10V)		
1	BK	supply voltage + 24 V DC
2	WH	output signal 0..10 V DC
3	BU	supply voltage 0 V DC
4	BK	not connected

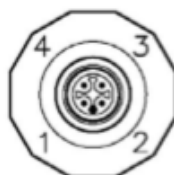


Рис.2.10 Схема підключення датчика тиску *BDSensors 26.600G*

Датчик рівня рідини в резервуарі

На сьогоднішній день важливо вміти не тільки ефективно транспортувати рідини, а і точно контролювати рівень рідини в ємкостях. Саме тому для вирішування цієї задачі в харчовій, хімічній та фармацевтичній промисловості використовуються різноманітні вимірювальні пристрої – датчики, кожен із яких має свою сферу застосування.

Одним із таких вимірювальних пристроїв є ультразвуковий датчик рівня *3RG623 Pepperl+Fuchs* показано на рис.2.11. який принципово складається із генератора ультразвукових імпульсів та приймача.

Принцип роботи датчика ґрунтується на властивості ультразвукових хвиль випромінюватись та відбиватись від перешкод, знаючи тривалість проміжку часу між генеруванням імпульсу хвиль та їх прийманням можна визначити відстань до об'єкту відбиття.

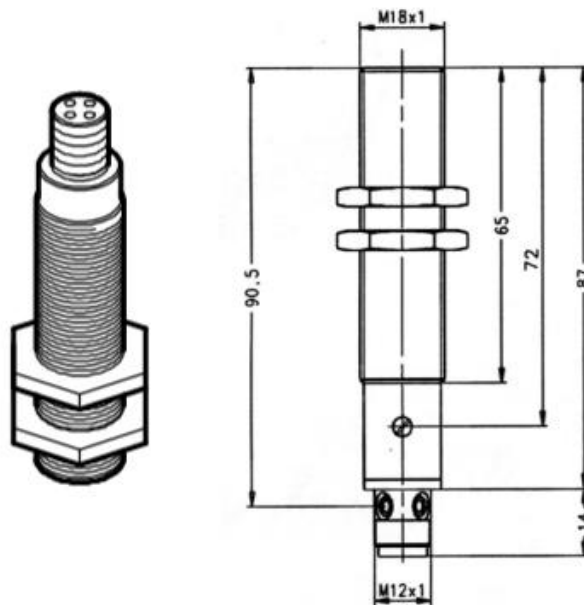


Рис.2.11 Загальний вигляд та приєднувальні розміри ультразвукового датчика *Pepperl+Fuchs AG 3RG623*

Таблиця 2.6

Технічні х-ки ультразвукового датчика *Pepperl+Fuchs AG 3RG623*

Характеристики	Значення
Аналоговий сигнал - діапазон напруг	0-10В
Температура навколишнього середовища	-25 /+70°C
Клас захисту	IP67
Напруга живлення	24В

Діапазон вимірювань	
- заводські налаштування	50 – 300мм.
- програмні налаштування	48 – 270мм.

Підключення даного датчика до блоку аналогових входів/виходів використовуємо 4-х провідну схему підключення, що показана на рис.2.12

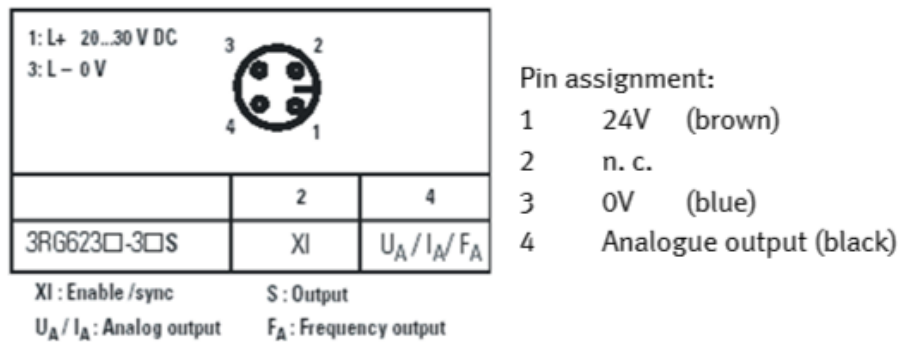


Рис.2.12 Схема підключення датчика *Pepperl+Fuchs AG 3RG623*

Датчик витрат рідини в системі

Для харчової промисловості завжди одним із найважливіших завдань було підвищити точність дозування рідкої харчової продукції, і на сьогоднішній день із широким використанням ПЛК та сучасних вимірювальних пристроїв це завдання вдалось виконати. Це стало можливим завдяки широкому використанню сучасних електронних датчиків витрат, що дозволяють побудувати гнучкі дозуючі системи, які б давали змогу швидко переналагоджувати виробництво тим самим підвищити ефективність обладнання.

Для дослідження витратних характеристик даної установки було використано магнітно-індуктивний витратомір *IFM SM6000*, що зображено на рис.2.13. Даний витратомір представляє собою багатофункціональний вимірювальний пристрій, який може вимірювати, як витрату рідини, так і температуру протікаючої рідини.

Принцип роботи даного датчика базується на Законі Фарадея та явищі індукції магнітного поля, але лише з тою різницею, що в магнітному полі переміщується рідина як провідник.

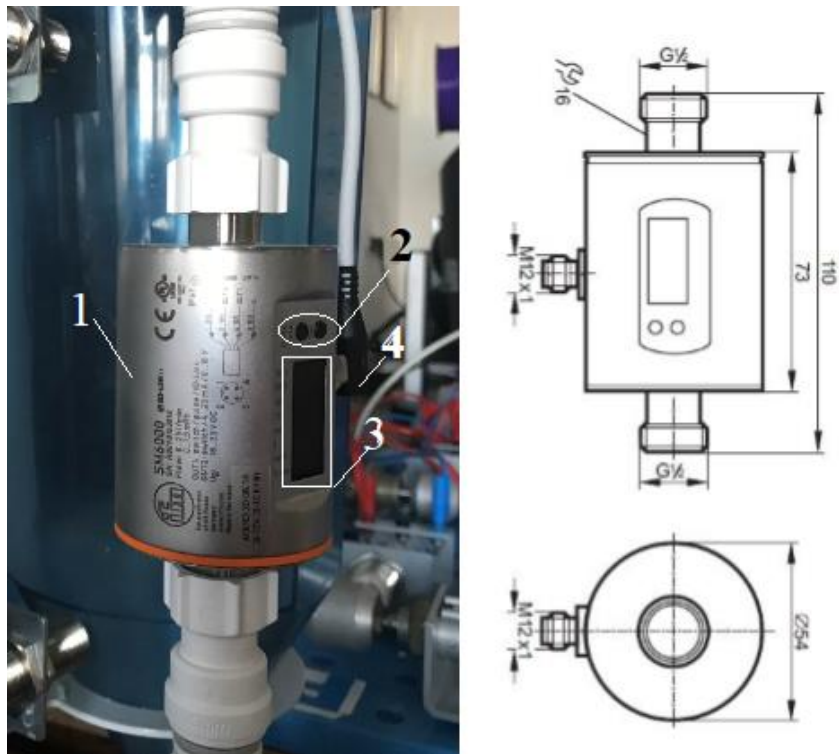


Рис.2.13 Магнітно-індуктивний датчик витрат *IFM SM6000*: 1 – корпус; 2 – інтерфейсні кнопки; 3 – дисплей; 4 – роз’єм 4-х піновий;

Для конфігурації та налаштування даного датчика в корпус поз.1 вмонтовано дисплей поз.3 що відображає вимірювані значення, а також одиниці вимірювання. Налаштування датчика здійснюється за допомогою двох кнопок поз.2, а підключення до аналогового блоку входів/виходів здійснюється за допомогою чотирьохпінового роз’єму поз.4, що підключається за схемою (рис.2.14.).

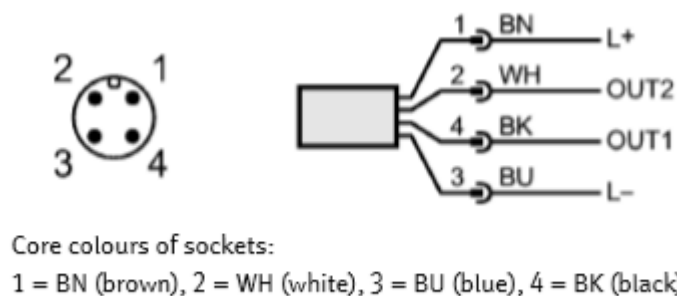


Рис.2.14 Схема підключення датчика *IFM SM6000*

Графік функції гідравлічного опору датчика тиску та технічні характеристики датчика подано на рис.2.15 і табл.2.7 відповідно.

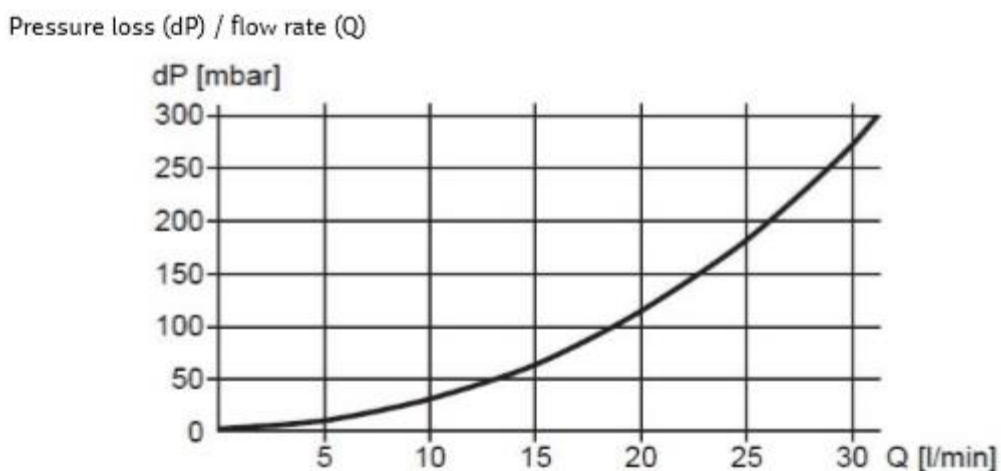


Рис.2.15 Графік функції гідравлічного опору датчика тиску в залежності від витрат в системі

Таблиця 2.7

Технічні характеристики датчика витрат *IFM SM6000*

Характеристики	Значення
Аналоговий сигнал	0-10 В/4-20 мА
Температура рідини	-20/+80 °С
Клас захисту	IP67
Напруга живлення	19-30 В
В'язкість	max. 70 мм ² /с (+40°С)
Діапазон вимірювань витрат (точність)	-30/+30 л./хв. (0,05 л./хв.)
Допустимий тиск	16 бар.
Споживання струму	95 мА
Електрична провідність Рідини	≥20 мкСМ/см

2.4.2 Контрольні вимірювальні пристрої

Для можливості перевірки адекватності показів аналогових електронних датчиків в систему вводяться контрольні вимірювальні прилади, які відрізняються за фізичними принципами вимірювання тих самих фізичних величин але мають меншу точність вимірювань.

Загальний вигляд манометра надлишкового тиску та його технічні характеристики, показано на рис.2.16 і табл.2.8 відповідно.

Таблиця 2.8

Технічні характеристики манометра надлишкового тиску

Характеристики	Значення
Межі вимірювань	0 – 1.0 бар
Робочий тиск	0 – 0.7бар
Клас захисту	IP43
Принцип вимірювань	Трубка Бурдона
Середовище вимірювань	Рідина / газоподібне середовище



Рис.2.16 Загальний вигляд манометра надлишкового тиску

Контроль величини витрат здійснюється за допомогою ротаметра *GEMÜ 840* при постійному перепаді тиску, принцип роботи якого базується на врівноваженні поплавка (рис.2.17 поз.2) , який поміщено в конічну трубку поз.1 під дією динамічного напору. Технічні характеристики даного пристрою показано у вигляді табл.2.9 та рис.2.17.

Таблиця 2.9

Технічні характеристики ротаметра *GEMÜ 840*

Характеристики	Значення
Межі вимірювань	5 – 500 л.год.
Робочий тиск	0 – 10бар

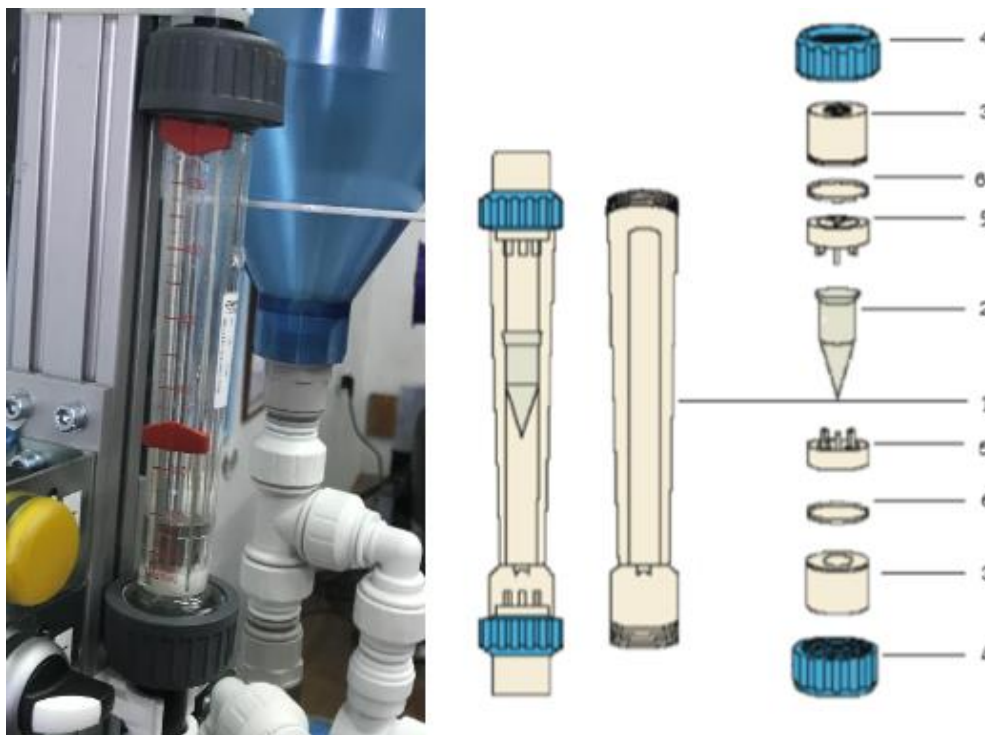


Рис.2.17 Конструкція та загальний вигляд ротаметра: 1- конічна трубка; 2- поплавок; 3 – різьбова втулка; 4 – ковпачок; 5 – патрубки; 6 – ущільнююче кільце;

Дискретні давачі сигналів

В багатьох гідравлічних системах, де рідина зберігається в резервуарах є необхідність знати лише певні критичні рівні, наприклад: найбільший та

найменший допустимий рівні. Для виконання цієї функції звісно можна встановити аналоговий датчик рівня (рис.2.11), який би давав сигнал рівня в широкому діапазоні, але з цією задачею можна впоратись і за допомогою менш вартісних ємкісних датчиків.

Типовий ємкісний датчик *BERNSTEIN KCN-T18* показано на рис.2.18, що конструктивно складається з двох монтажних гайок поз.1, які загвинчуються на корпусну нарізь поз.2. Підключення датчика до блоку цифрових входів/виходів здійснюється за схемою (рис.2.19). Налаштування чутливості датчика відбувається за рахунок потенціометричного гвинта (рис.2.18 поз.5), а світловий діод поз.4 сигналізує про спрацювання датчика. Технічні характеристики *BERNSTEIN KCN-T18* подано у вигляді табл.2.10.

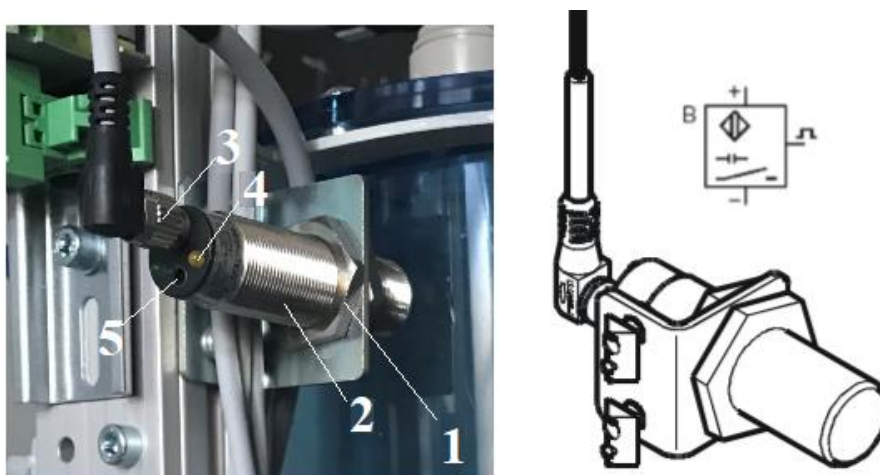


Рис.2.18 Загальний вигляд ємкісного датчика *BERNSTEIN KCN-T18* : 1 – монтажна гайка; 2 – корпусна нарізь; 3 – роз’єм 4-х піновий; 4 – світловий діод; 5 – потенціометричний гвинт;

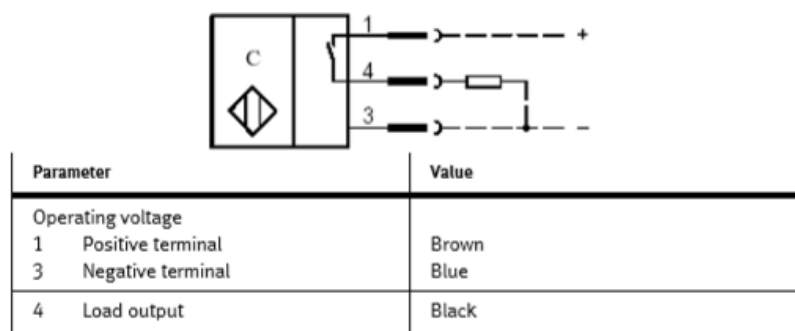


Рис.2.19 Схема підключення *BERNSTEIN KCN-T18*

Технічні характеристики ємкісного датчика *BERNSTEIN KCN-T18*

Характеристики	Значення
Дистанція спрацювання (можливість налаштування)	9,5 – 10мм
Максимальна частота вмик./вимк.	25Гц
Клас захисту	IP65
Допустима температура навколишнього середовища	-10/+50 °C
Тип вихідного сигналу	PNP, н.в.
Напруга живлення	12/48V DC

2.5 Система керування дослідної установки

2.5.1 Структура системи керування

Для кращого розуміння роботи системи керування дослідної установки *Festo EduKit PA Advanced* її можна представити у вигляді структури (рис.2.20) , яка відображає основні компоненти системи, а також інформаційні зв'язки між ними.

Центральним елементом системи керування виступає ПК поз.9 із встановленим програмним забезпеченням *FluidLab-PA process* (рис.2.21), яке безпосередньо через інформаційний USB кабель (рис.2.20 поз.8) обмінюється інформацією з *EasyPort USB* інтерфейсом поз.1. На передній панелі *EasyPort* інтерфейсу знаходиться світлова індикація поз.10 , які відображають стан дискретних входів/виходів, а також дисплей поз.11, який відображає поточне значення під'єднаних аналогових датчиків.

В свою чергу *EasyPort* інтерфейс має два цифрових роз'єма *SysLink*, а також аналоговий до яких підключаються відповідні кабелі поз.3,5. Підключення датчиків та робочих органів здійснюється на периферії до дискретного та аналогового блоку входів/виходів поз.2, 4 відповідно.

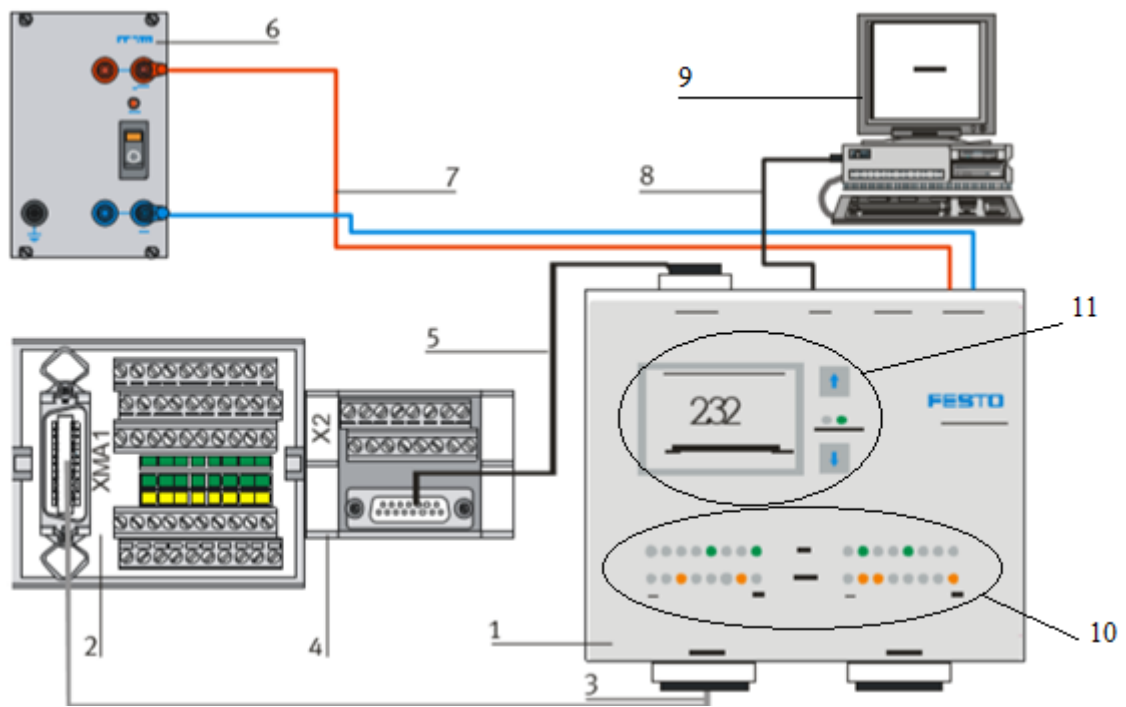
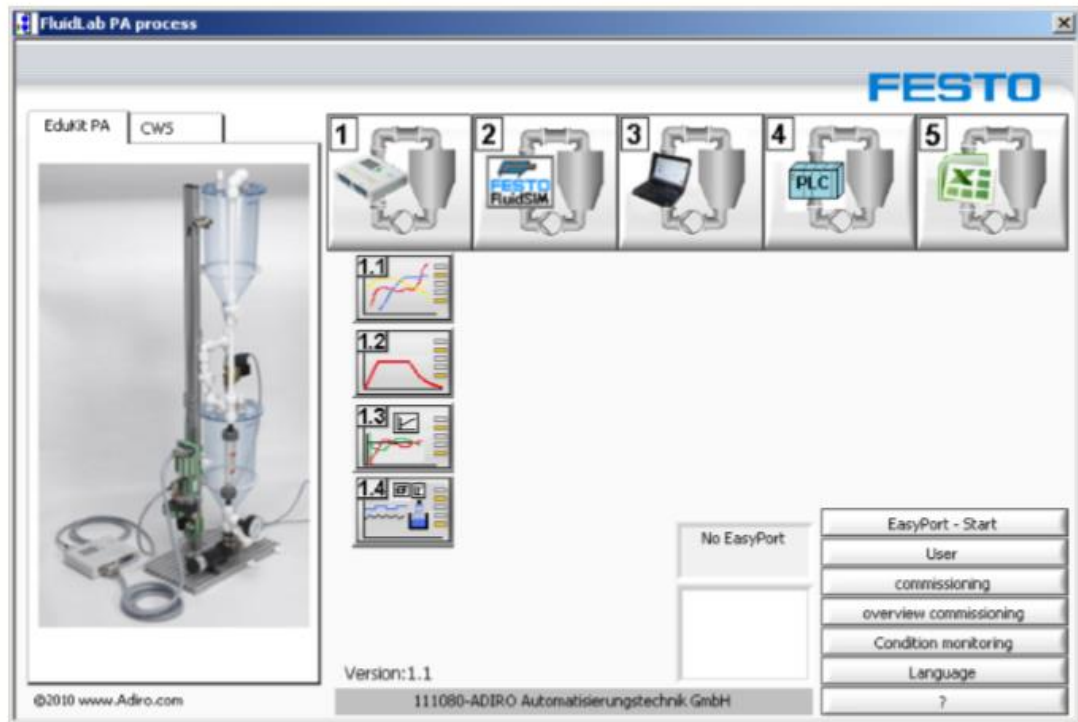


Рис.2.20 Топологічна структура Festo *EduKit PA Advanced*: 1 – EasyPort інтерфейс; 2 – дискретний блок входів/виходів; 3 – кабель підключення дискретних входів/виходів; 4 – аналоговий блок входів/виходів; 5 – кабель підключення аналогових входів/виходів; 6 – блок живлення; 7 – електричні провідники ; 8 – USB-кабель; 9 – ПК; 10 – світлова індикація; 11 – дисплей та інтерфейсні кнопки;

2.5.2 Програмне забезпечення

Програмне забезпечення *Festo FluidLab-PA process* – це багатофункціональна навчально-дослідна платформа, яка в режимі реального часу дає змогу відслідковувати технологічні параметри системи, а також має вбудовані функції контролю технологічних параметрів. Для роботи в даному середовищі пропонується 5 режимів керування (рис.2.21 поз.1 – 5). Керування може здійснюватись за допомогою програмного забезпечення *Festo FluidLab-PA process, Festo FluidSim, STEP7, ПЛК* або за допомогою комунікацією з таблицями *Excel* . Для кожного з перерахованих режимів передбачене виконання певної технологічної задачі (рис.2.21 поз.1.1-1.4).



Fluid Lab®-PA process start screen

Рис.2.21 Програмне забезпечення *Festo FluidLab-PA process*

Технологічні задачі мають на меті наступні цілі:

- введення в експлуатацію мехатронної системи;
- діагностика дискретних та аналогових датчиків;
- запис отриманих значень датчиків у вигляді графіків;
- обробка отриманих значень;

У вікні технологічної задачі Вимірювання і контроль (рис.2.22) в області поз.1 виконується налаштування вимірюваних величини, що будуть записуватись у вигляді графіків. Після чого в області поз.2 за допомогою перемикачів та повзунків можна приступити до керування робочими органами установки. Після закінчення проведення експериментів, передбачена можливість запису результатів дослідів у вигляді таблиць *Excel* або текстових файлів з розширенням (.txt) поле поз.3, що дає змогу зручно обробляти отримані результати досліджень.

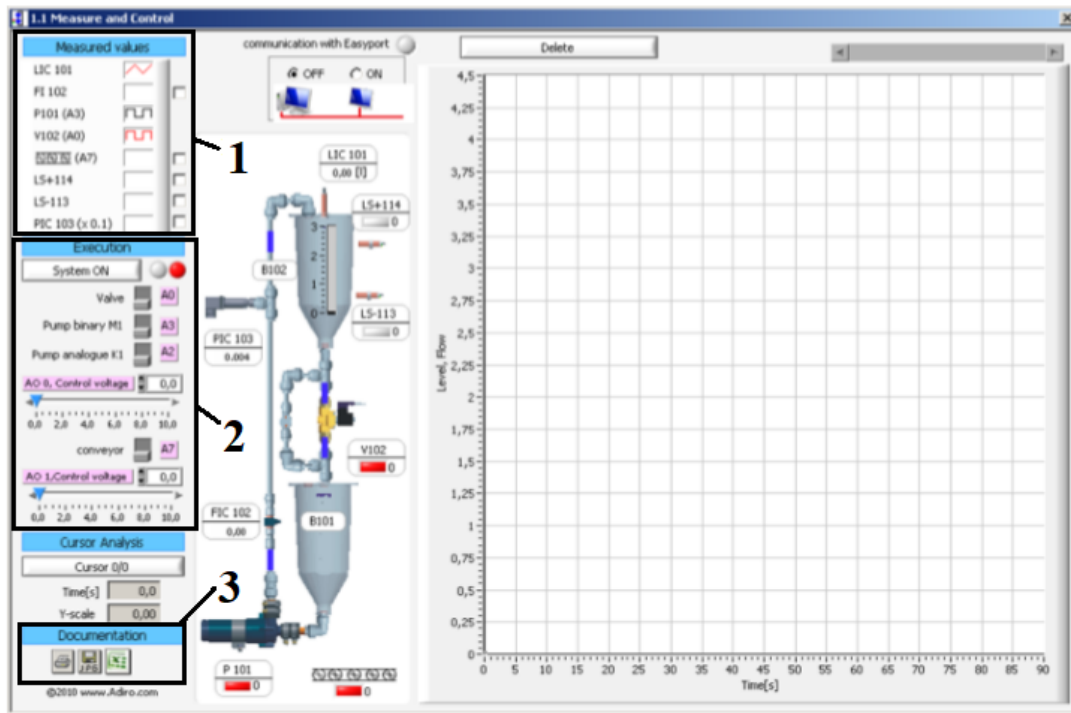


Рис.2.22 Вікно задачі Вимірювання і контроль: 1 – зона налаштувань графіків; 2 – область керування робочими органами; 3 – запис результатів досліджень;

2.5.3 Електричне оснащення та загальна схема підключення

Будь-яке сучасне технологічне обладнання не можливо уявити без електронних пристроїв, які дають змогу створювати високопродуктивні, багатофункціональні системи. Водночас з цим сучасний науково-технічний прогрес постійно диктує нові вимоги до безпеки, якості та ефективності сучасного обладнання. На найпрогресивніших підприємствах вже не зустріти звичайного технологічного обладнання, воно витіснилось інтелектуальними системами, які дають змогу обмінюватись інформацією, самодіагностуватись та взаємодіяти із обслуговуючим персоналом.

Відповідно до сучасних тенденцій побудови мехатронних систем , в дослідній установці *Festo EduKit PA Advanced* підключення датчиків та виконавчих органів до системи управління здійснюється за допомогою електричної панелі керування (рис.2.23), що складається із цифрового поз.2 та аналогового поз.3 блоку входів/виходів та електромагнітного реле поз. 4.

Керування двигуном насосної станції здійснюється опосередковано за допомогою драйвера поз.6, необхідність додаткового модуля для керування двигуном пояснюється високою напругою керування двигуна 24V, а також високими пусковими струмами ($I_p > 1A$), які при прямому підключенні до модулів виводу можуть вивести його з ладу. Керування електромагнітним клапаном здійснюється за рахунок непрямого підключення через реле поз.5. Захист двигуна від небезпечних струмів здійснюється за рахунок захисного реле поз.7. Для додаткового захисту обладнання та людей, передбачена наявність заземлюючих PE клем поз.8, а також клеми живлення поз.9. Монтаж електричної панелі здійснюється за допомогою DIN-рейки поз.1, що жорстко закріплена на профільній плиті.

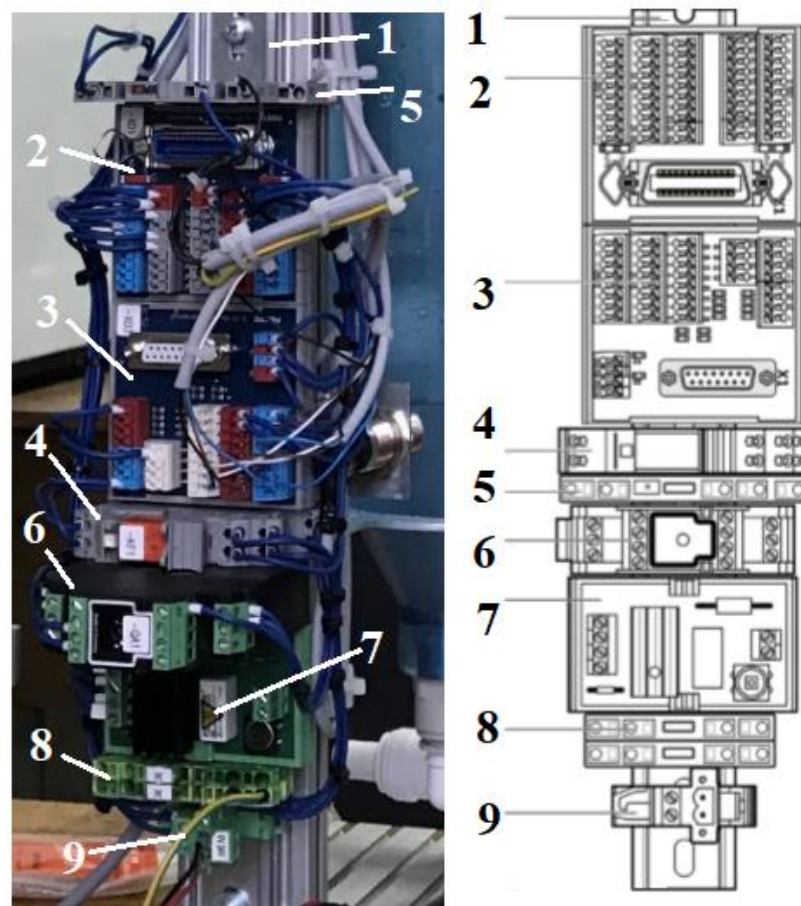


Рис.2.23 Електрична панель експериментальної установки Festo EduKit PA Advanced: 1-DIN- рейка; 2-цифровий блок входів/виходів; 3- аналоговий блок входів/виходів; 4- реле з двома групами контактів; 5- реле з одною групою

контактів; 6- контролер двигуна; 7-стартовий запобіжник струму; 8- термінал PE; 9- термінал двигуна;

Система живлення

Для живлення дослідної установки використовується блок живлення , що перетворює однофазний змінний струм 220В в постійний струм 24В. Схема підключення блоку живлення здійснюється за принциповою схемою, що показана на рис.2.24, де 1 – блок живлення 100Вт; 2 – провідники; 3- EasyPort інтерфейс;

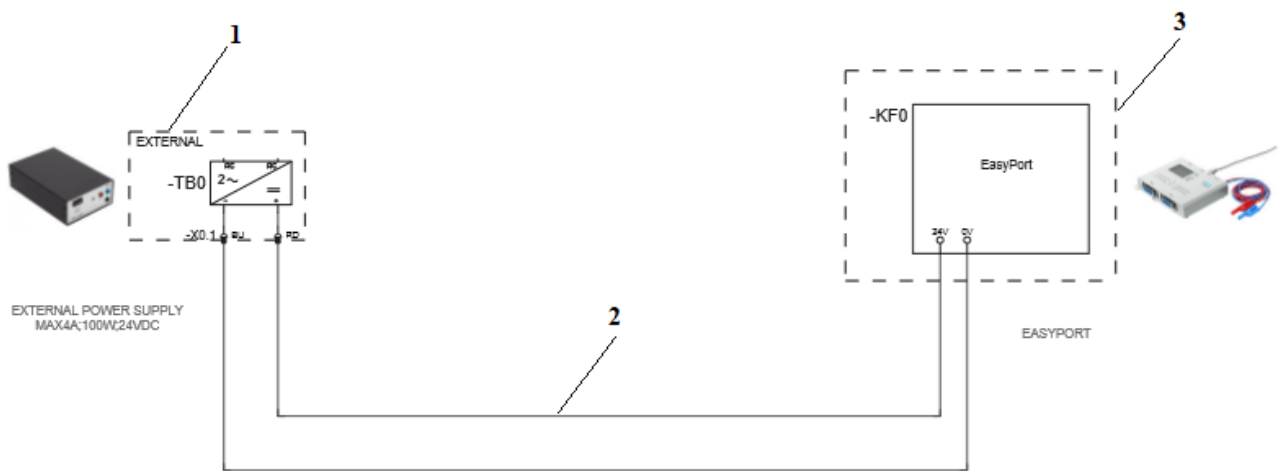


Рис.2.24 Схема підключення блоку живлення

Блоки аналогових та цифрових входів/виходів

Блоки входів/виходів – це швидкоз'ємні компактні модулі, які виконують функції концентрації та групування вхідних та вихідних керуючих сигналів на окремому модулі в мехатронних системах. Зручність використання таких пристроїв виправдовує себе в складних машинах, які будуються агрегатно-модульним принципом, тому сенс відокремлювати функціональні модулі не тільки на рівні конструкції всієї машини, а і на рівні побудови електричних зв'язків. Завдяки використанню таких розподілених модулів з'являється принципово нова логіка в побудові мехатронної системи, що робить всю систему з одного боку складнішою, але з іншого – гнучкою і масштабованою. Такий підхід дає змогу швидше виявляти та усувати

несправності в системі, модифікувати обладнання та покращує загальну надійність машини.

Загальний вигляд блоку цифрових входів/виходів показано на рис.2.25, конструктивно можна виділити наступні елементи : клеми виходів поз.1 ,які призначені для передачі керуючих сигналів від ПЛК до робочих органів , клеми входів поз.2 функція яких полягає в передачі сигналів від датчиків до ПЛК. Підключення блоку до ПЛК здійснюється через гніздо для кабелю поз.3, а перемикач поз.4 забезпечує можливість під'єднання робочих органів або датчиків до клем, за схемами PNP або NPN.

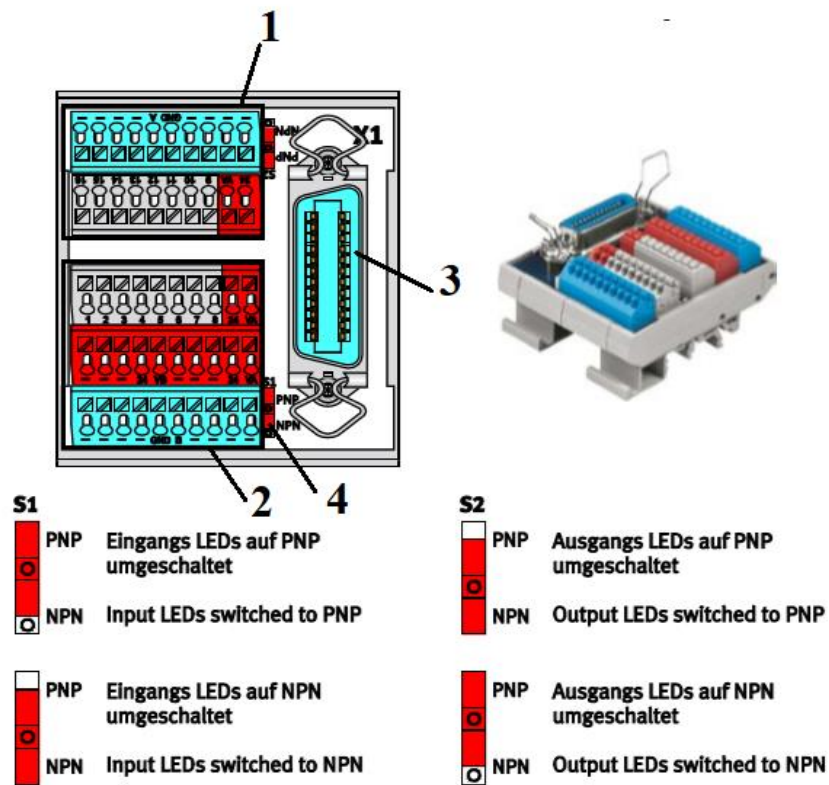


Рис.2.25 Цифровий блок входів/виходів: 1 – клеми дискретних виходів; 2 – клеми дискретних входів; 3 – роз’єм SysLink; 4 – DIP-перемикач;

Аналоговий блок входів/виходів (рис.2.26) має аналогічні функції, що і дискретний, але може приймати діапазон значень сигналів 0-10В, 4-20мА або 0-20мА .

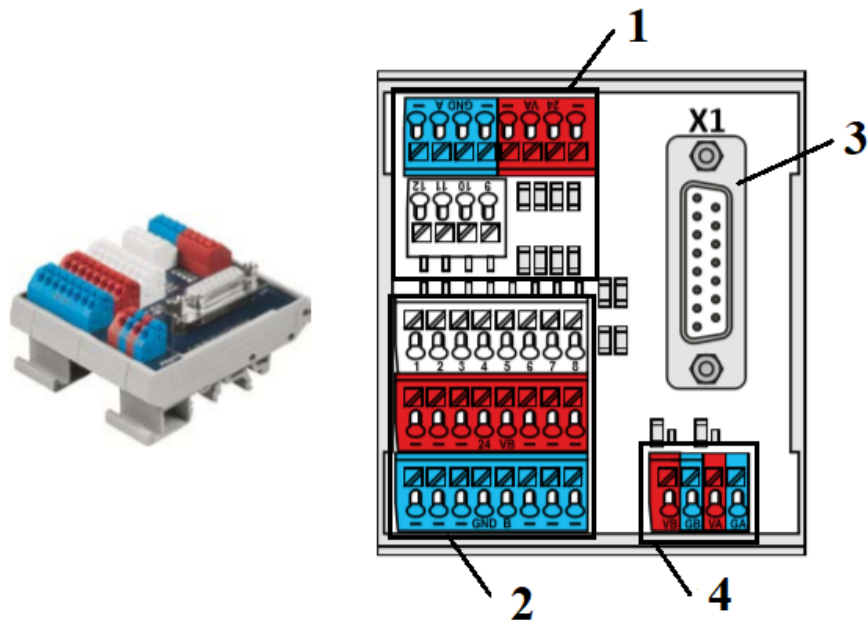
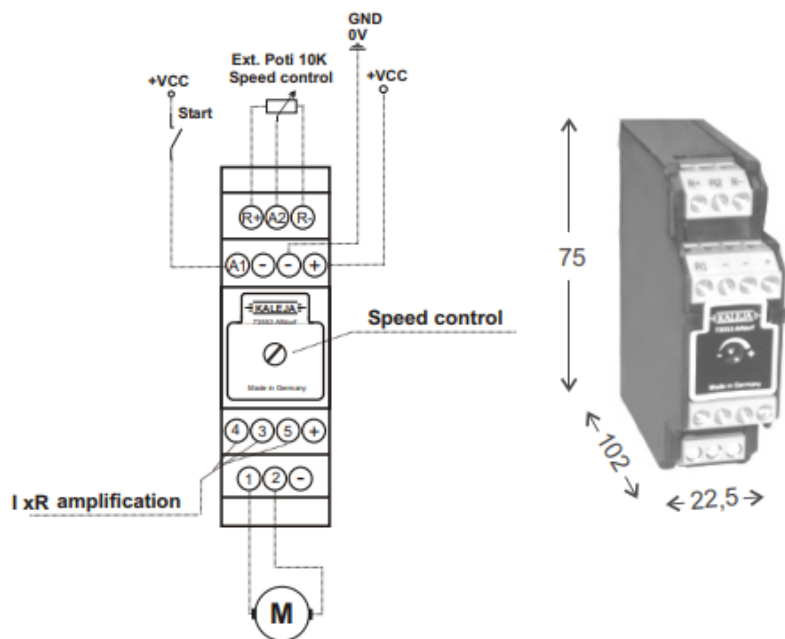


Рис.2.26 Аналоговий блок входів/виходів: 1 – клеми виходів; 2 – клеми входів; 3-гніздо інформаційного кабелю; 4 – клеми живлення блоку входів/виходів;

Контролер двигуна

Регулювання обертів двигуна постійного струму здійснюється за допомогою контролера KALEJA Махі-1Q-4-30 загальний вигляд якого та схему підключення до системи управління показано на рис.2.27. Керування може здійснюватись вручну за допомогою потенціометричного гвинта, в дискретному режимі через клему А1, а також аналоговим сигналом 0-10В клеми R+/R-, підключення двигуна здійснюється до клем 1,2 . Принцип роботи пристрою базується на властивостях польових транзисторів MOSFET. Технічні характеристики вхідного та вихідного контурів контролера KALEJA Махі-1Q-4-30 показані у вигляді табл.2.11,2.12.



R+	Ref. 10V	Externe potentiometer 10 kΩ. Speed setpoint adjustment
A2	n-setpoint	
R-	Ref. 0V	
A1	Start	
0V	Earth	
0V	AGNDO (Analogue earth for outputs)	
+	+VCC (supply voltage)	
4	IxR amplification 2	
3	IxR amplification 1	
-	GND (earth) amplification 1+2	
+	Supply voltage	
1	Motor (+)	Motor connection
2	Motor (-)	
-	Earth	

Рис.2.27 Загальний вигляд та схема підключення контролера KALEJA Maxi-1Q-4-30

Таблиця 2.11

Технічні характеристики вхідного контуру керування

Характеристики	Значення
Діапазон робочих напруг живлення	18-35В
Діапазон напруг аналогового сигналу	0-10В
Вхідний струм	10мА

Технічні характеристики вихідного контуру керування

Характеристики	Значення
Діапазон робочих напруг живлення	18-35В
Елемент силового керування	MOS-FET
Максимальний струм перевантаження	15А
Допустимий робочий струм	3,5А

Захист електрообладнання

Робота будь-якого електричного обладнання супроводжується протіканням струмів в системі живлення, величина струмів в кожному конкретному випадку залежить від особливостей механізмів, а також від режимів їхньої роботи. Саме критичні значення струму можуть призвести до часткового, або повного виходу з роботи обладнання. Наприклад, довготривале проходження високих струмів через обмотки двигуна може призвести до перегріву обмоток електродвигуна, що в свою чергу веде до пошкодження ізоляції обмоток із подальшим виходом з ладу двигуна. Тому при проектуванні таких механізмів необхідно розуміти режими роботи обладнання, брати до уваги механічні та вольт-амперні характеристики електромеханічних компонентів системи. І на основі цих даних підбирати пристрої захисту електрообладнання від небезпечних струмів.

Для захисту двигуна постійного струму, який виконує функцію насосної станції в дослідній установці *Festo EduKit PA Advanced* використовується стартовий запобіжник струму загальний вигляд та схему підключення до двигуна якого показано на рис.2.28, технічні характеристики подано в табл.2.13.

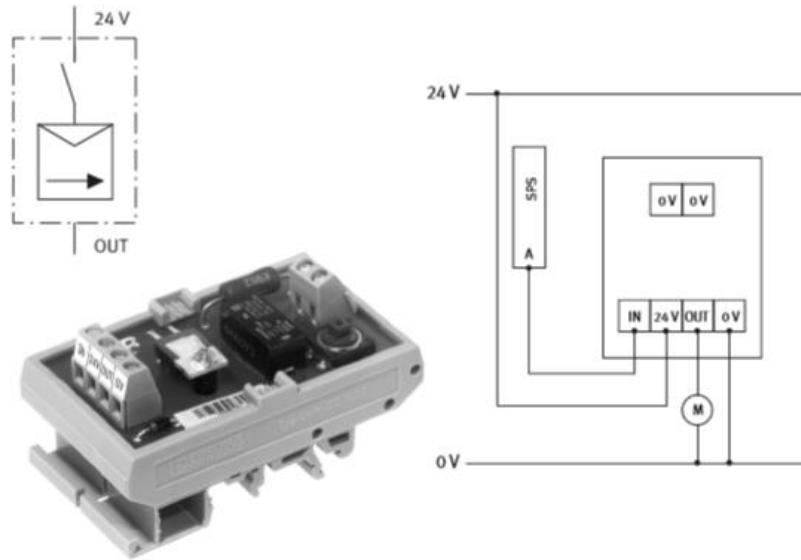


Рис.2.28 Стартовий запобіжник струму

Таблиця 2.13

Технічні характеристики стартового запобіжника струму

Характеристики	Значення
Напруга живлення	24В
Максимальна частота перемикавання	1Гц
Робочий струм	1А
Допустимий робочий струм	2А

Висновки до розділу №2

За результатами детального аналізу мехатронної системи, можна зробити наступні висновки:

1. Використана дослідна установка **Festo EduKit PA Advanced** відповідає сучасним тенденціям побудови технологічного обладнання за агрегатно-модульним принципом з використанням мехатронних модулів;
2. Дослідження будова системи керування, зворотних зв'язків та робочих органів свідчить, що дослідна установка має замкнену систему керування;
3. В поєднанні із сучасними ПЛК дана установка може виконувати наступні технологічні задачі автоматичного регулювання :
 - a. Підтримання заданого рівня рідини в резервуарі;
 - b. Контроль та підтримання тиску рідини в системі трубопроводів;
 - c. Забезпечення сталої величини витрат рідини гідравлічної системи;
 - d. Імітація дозування рідкої харчової продукції;
4. Використання електронних вимірювальних пристроїв та ПЛК дозволяє збільшити точність процесу вимірювання технологічних параметрів (тиск, рівень, витрати) та зменшити похибку вимірювань під час проведення експериментальних досліджень.

Розділ 3. Дослідження технологічних параметрів гідравлічної мехатронної системи

Основним завданням дослідження гідравлічної мехатронної системи **Festo EduKit PA Advanced** є визначення рівняння напірної характеристики трубопровідної мережі, а також побудова графіку робочих характеристик насосу. На першому етапі досліджень необхідно аналітично дослідити дану гідравлічну систему.

3.1 Трубопровідна мережа

Напірна характеристика трубопровідної мережі – це функція, що описує залежність напору H [м.вод.ст.],[бар.], що створюється в мережі, від величини витрат рідини Q [м³/год.],[л./хв.] в цій мережі.

$$H = f(Q)$$

За структурою трубопровідні мережі можна розділити на декілька видів:

- *Проста мережа* складається із одного витратного резервуару та одного приймального, які сполучені трубопроводом, що немає розгалужень, (рис.3.1, а);
- *Розгалужена мережа* має декілька приймальних резервуарів, розміщених на різній висоті. Після насосної станції, система трубопроводів може мати розгалуження, що ведуть до кінцевих приймальних резервуарів, (рис.3.1, б);
- *Замкнута мережа* в такій системі роль приймального та витратного резервуару виконує одна ємність. В такій трубопровідній мережі рідина

циркулює по круговому трубопроводу, проходячи через апарати або певні механізми, (рис.3.1, в);

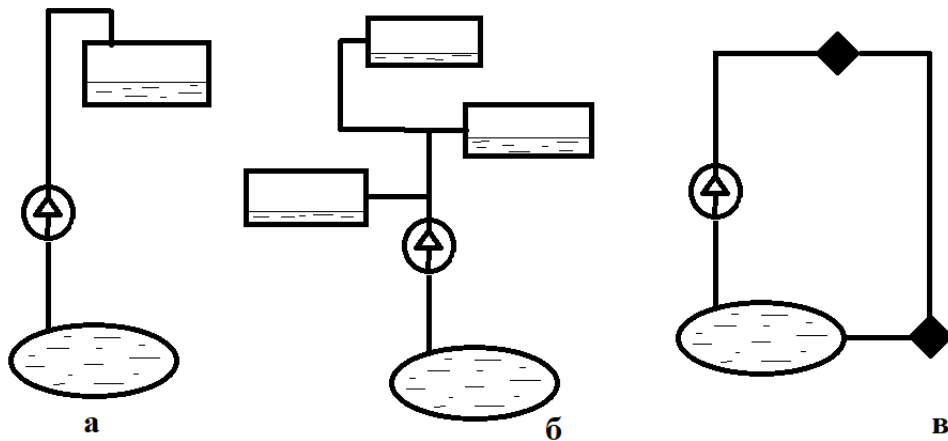


Рис.3.1. Класифікація трубопровідних мереж: а – проста; б – розгалужена; в – замкнута;

Проаналізувавши конструкцію та процес роботи дослідної установки *Festo EduKit PA Advanced*, (рис.3.2.) , можна зробити висновок, що відповідно до поданої вище класифікації трубопровідна мережа даної системи може бути як *простою (зовнішній контур)* , так і *замкнутою (внутрішній контур)*.

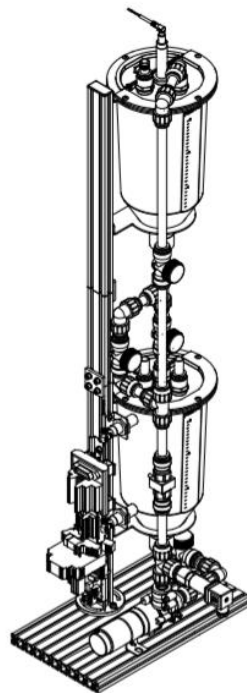


Рис.3.2 Загальний вигляд дослідної установки *Festo EduKit PA Advanced*

Для подальших досліджень нас цікавить рух рідини по зовнішньому контуру до верхнього резервуару, при цьому напірна характеристика простої трубопровідної мережі можна визначити за формулою:

$$H = H_{\text{ст}} + k * Q^2 \quad (1)$$

H – необхідний напір мережі; $H_{\text{ст}}$ – статичний напір мережі; Q – величина витрат; k – зведений коефіцієнт втрат напору на подолання опорів;

$$H_{\text{ст}} = H_{\Gamma} + \frac{P_2 - P_1}{\rho * g} \quad (2)$$

H_{Γ} – геометрична висота підйому рідини; P_1, P_2 – тиск в витратному і приймальному резервуарі; ρ – густина рідин; g – гравітаційна стала;

$$k = \lambda \frac{L}{d^5} + \frac{\sum \xi}{d^4} \quad (3),$$

λ – коефіцієнт тертя рідини; L – довжина трубопроводів; d – діаметр трубопроводу; $\sum \xi$ – алгебраїчна сума місцевих опорів;

Підставивши вирази (2), (3) в формулу (1), а також отримаємо залежність для визначення необхідного напору від величини витрат:

$$H_{\text{ст}} = H_{\Gamma} + \frac{P_2 - P_1}{\rho * g} + 0,083 \left(\lambda \frac{L}{d^5} + \frac{\sum \xi}{d^4} \right) * Q^2 \quad (4)$$

У випадку, якщо на поверхню рідини у витратному та приймальному резервуарах діє лише атмосферний тиск, то формула (4) приймає наступний вигляд:

$$H_{\text{ст}} = H_{\Gamma} + 0,083 \left(\lambda \frac{L}{d^5} + \frac{\sum \xi}{d^4} \right) * Q^2 \quad (5)$$

Аналізуючи формулу (5) необхідно зауважити, що H_{Γ} – це напір, що відповідає висоті підйому рідини, при якому рідина підіймається на відповідну висоту, але не переміщується.

Графічно, рівняння (5) можна зобразити у вигляді графіка, (рис.3.3)

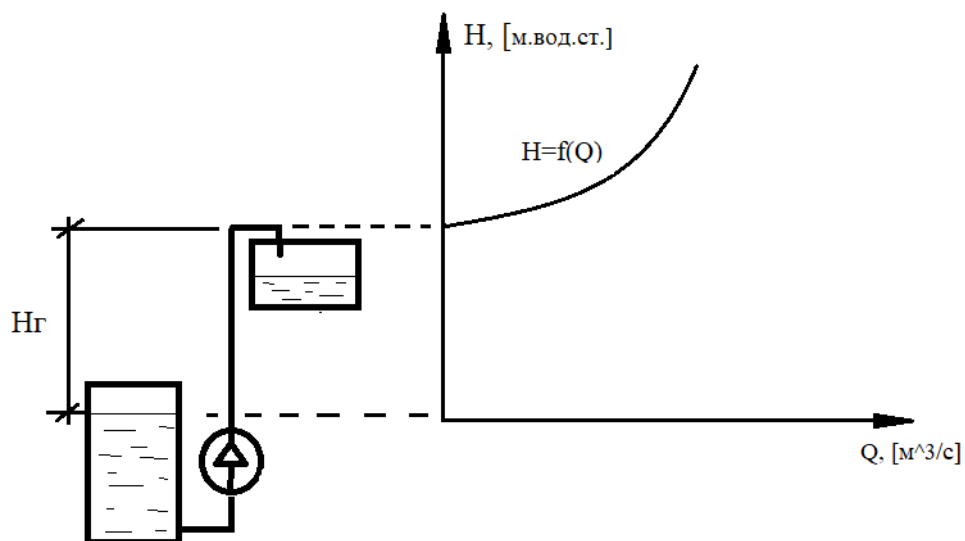


Рис.3.3. Типова напірна характеристика трубопровідної мережі

Друга складова рівняння [5] визначає енергію, яка б дозволила рідині переміщуватись в системі з заданою величиною витрат Q , долаючи гідравлічний опір.

Гідравлічні опори - це будь-які перешкоди на шляху руху рідин, що викликають деформацію потоку у вигляді зміни швидкості руху по величині чи напрямку, або по величині і напрямку одночасно. Гідравлічні опори діляться на опори *по довжині* і *місцеві опори*.

Опори по довжині обумовлені шорсткістю стінок русла і в'язкістю рідини. Вони рівномірно розподілені по всій довжині потоку, а тому і мають відповідну назву.

Місцеві опори обумовлені місцевою деформацією потоку, яка викликається зміною напрямку чи розмірів русла (трубопроводу чи відкритого русла), пристроями запірно-регулюючої арматури (крани, вентиля, засувки), фасонними частинами (муфти, трійники, хрестовину і ін.) та іншими пристроями.

На подолання гідравлічних опорів потоком витрачається напір (енергія). Загальні втрати напору, згідно з рівнянням Бернуллі для потоку реальної

рідини h_B , складаються з втрат напору по довжині $h_{\text{дов}}$ та в місцевих опорах h_M , тобто:

$$h_B = h_{\text{дов}} + h_M \quad (6)$$

Втрати тиску на тертя в прямих трубах і каналах, при випадку ізотермічного потоку, можна обчислити за *формулою Дарсі-Вейсбаха* (7):

$$h_{\text{дов}} = \Delta p_{\text{тр}} = \lambda \frac{L}{d} * \frac{\omega^2 * \rho}{2} \quad (7)$$

, λ – коефіцієнт тертя рідини; L – довжина трубопроводів; d – діаметр трубопроводу, ω – швидкість руху рідини по трубопроводу; ρ – густина рідин;

При обчисленні коефіцієнта тертя рідини λ , обов'язково необхідно враховувати режим потоку рідини, що характеризується Критерієм Рейнольдса. Цьому питанню присвячені праці багатьох вчених і зокрема І. Нікурадзе, виконані в 20-і роки минулого століття в Німеччині.

За результатами цих дослідів були побудовані графіки залежності коефіцієнта λ від числа Re в координатах $\lg(100\lambda) - \lg(Re)$ при значеннях відносної шорсткості труб $\frac{d}{\Delta}$, рис.3.4.

Із графіка видно, що при напірному русі рідини в круглих трубопроводах існує п'ять різних областей опорів:

- перша область при $Re < 2320$, ($\lg(Re) < 3,36$) характеризує ламінарний режим руху рідини (пряма I);
- друга область $2320 < Re < 4000$, ($3,36 < \lg(Re) < 3,6$) характеризує стрибкоподібний перехід від ламінарного режиму до турбулентного;

- третя область характеризує турбулентний режим руху рідини по гідравлічно гладким трубам (у цьому випадку $\lg(\lambda)$ змінюється по пологій прямій II);
- четверта область являє собою перехід від області руху по гідравлічно гладких трубах до квадратичної області (область між лініями II і III);
- п'ята область характеризує турбулентний режим в квадратичній області опорів (область правіше лінії III).

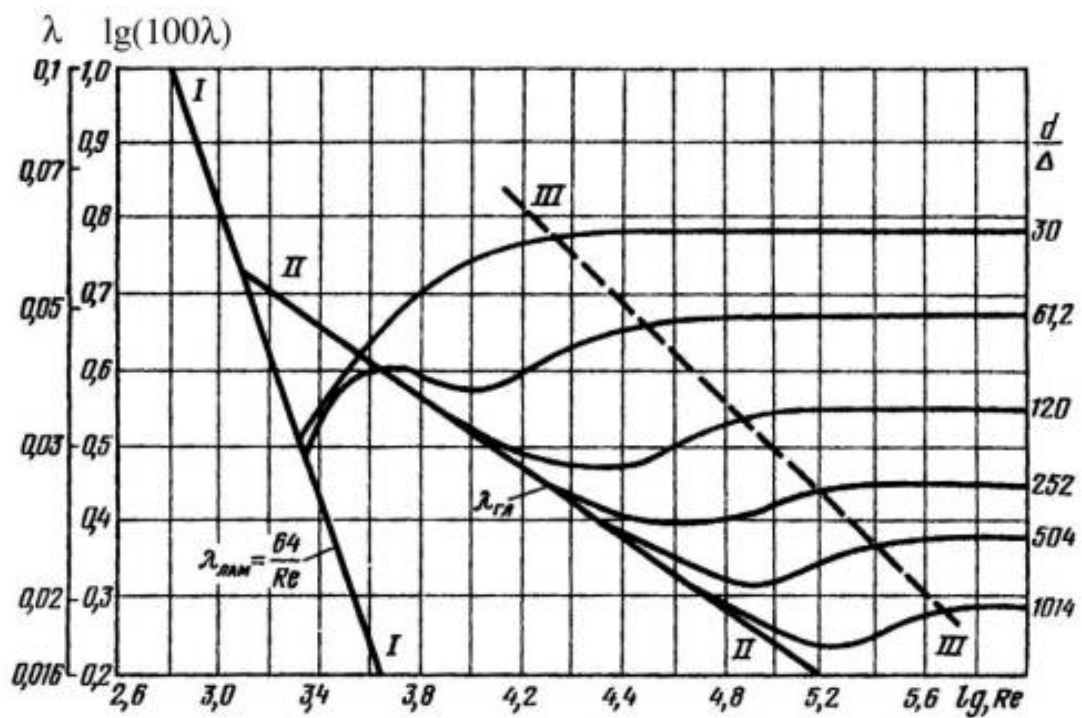


Рис.3.4 Графіки залежностей $\lambda = f(Re)$

І так, при ламінарному русі рідини, ($Re < 2300$), $\lambda = \frac{64}{Re}$;

При турбулентному режимі руху рідини при знаходженні значення коефіцієнта λ мають місце три зони опорів:

- зона гідравлічно гладкого руху при якому виступи шорсткості Δ_e втоплені в ламінарній плівці товщиною $\delta_{\text{л.п}}$, тобто $\delta_{\text{л.п}} > \Delta_e$, і справджується умова $Re_{\text{кр}} < Re < 20 \frac{d}{\Delta_e}$, де коефіцієнт λ визначається за формулою:

$$\lambda = \frac{0.316}{Re^{0.25}} \quad (8)$$

- перехідна зона $\delta_{л.п} = \Delta_e$, яка матиме місце при $20 \frac{d}{\Delta_e} < Re < 500 \frac{d}{\Delta_e}$

коефіцієнт λ визначається за формулою:

$$\lambda = 0,11 \sqrt[4]{\frac{\Delta_e}{d} + \frac{68}{Re}} \quad (9)$$

- квадратична зона – зона повністю шорсткого руху, $\delta_{л.п} < \Delta_e$, яка матиме місце при $Re > 500 \frac{d}{\Delta_e}$ тоді коефіцієнт λ визначається за формулою:

$$\lambda = 0,11 \sqrt[4]{\frac{\Delta_e}{d}} \quad (10)$$

Всі перераховані залежності для визначення коефіцієнта λ можна представити у вигляді табл. 3.1 .

Таблиця 3.1

Формули для визначення коефіцієнта λ , та характер впливу швидкості V на втрати напору по довжині

$\lambda = \frac{64}{R_e}$ $h_{доп.} \equiv V$	$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{R_e}}$ $h_{доп.} \equiv V^{1.75}$	$\lambda = 0,11 \sqrt[4]{\frac{\Delta_e}{d} + \frac{68}{R_e}}$ $h_{доп.} \equiv V^{1.75..2}$	$\lambda = 0,11 \sqrt[4]{\frac{\Delta_e}{d}}$ $h_{доп.} \equiv V^2$
	Гідравлічно гладкі труби	Перехідна зона	Квадратична зона
Ламінарний режим	Турбулентний режим		
$R_e < R_{e,сп} = 2320$	$R_{e,сп.} < R_e < 20 \frac{d}{\Delta_e}$	$20 \frac{d}{\Delta_e} < R_e < 500 \frac{d}{\Delta_e}$	$R_e > 500 \frac{d}{\Delta_e}$

Визначення втрат напору на місцевих опорах здійснюють за формулою Дарсі:

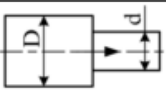
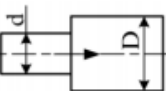
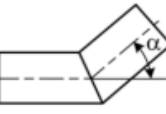
$$\Delta p_c = \sum \xi \left(\frac{\omega^2 * \rho}{2} \right), \quad (11)$$

де ξ – величина місцевих опорів.

Для переважної більшості місцевих опорів коефіцієнт місцевого опору ξ визначається дослідним шляхом (табл. 3.2.) і тільки для деяких з них він може бути визначений теоретично.

Таблиця 3.2.

Коефіцієнти ξ для деяких місцевих опорів

Назва опору	Схема вузла опору	Значення коефіцієнта ζ							
		$(D/d)^2$	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0,01
Раптове розширення		ζ	0	0,04	0,16	0,36	0,64	0,81	0,98
		$(D/d)^2$	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0,01
Раптове звуження		ζ	0	0,15	0,25	0,34	0,45	0,5	
		$(d/D)^2$	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	
Різкий поворот труби		α^0	20	40	60	80	90	120	140
		ζ	0,05	0,14	0,37	0,74	0,99	1,86	2,43

3.2 Характеристика насосних станцій

В загальному випадку, для перекачування рідин в харчовій промисловості використовують насоси. Основна функція таких гідромашин є перетворення механічної енергії двигуна на енергію переміщення рідини.

Гідромашини поділяються на (рис.3.5).:

- лопатні (відцентрові, осьові, гідравлічні турбіни);
- об'ємні, які діють за принципом витіснення рідини (роторні, поршневі та ін.);
- спеціальні пристрої, які використовуються для переміщення рідини (гідравлічні тарани, ежектори, ерліфти);

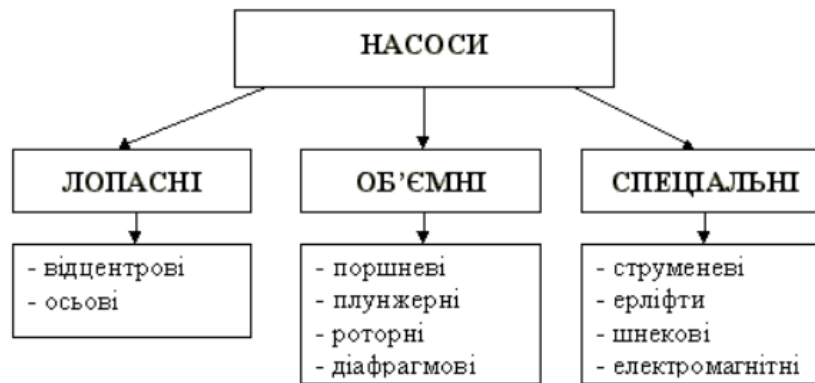


Рис.3.5. Класифікація насосів

Для переміщення рідини в дослідній установці *Festo EduKit PA Advanced* використовується лопатний відцентровий насос (рис.2.8.), що приводиться в рух двигуном постійного струму.

З метою оцінювання роботи будь-якого насосу виробниками проводяться випробування результати яких подають у вигляді таблиць (рис.3.6.), мета випробовувань – встановити робочу (статичну) характеристику відцентрового насоса, тобто залежності тиску від подачі насоса.

Pressure (bar)	Delivery rate (l/min)	Current at 24 V (A)
0.1	26	1.1
0.2	19,5	1.0
0.3	9,0	0.75
Measured values apply for a tubing connection of 3/4" (20 mm)		

Рис.3.6. Паспортні дані *SPX Johnson Circulating pump 24V*

Випробування для визначення робочих характеристик проводиться при постійній, фіксованій частоті обертання колеса відцентрового насоса, яка вимірюється за допомогою тахометра. Регулюючи ступінь відкриття засувки на напірному трубопроводі, одержують різні витрати води на виході з

приладу, які вимірюються за допомогою витратоміра. Для кожного значення Q розраховують тиск H , потужність N та ККД.

Знаючи характеристику насоса на етапі розробки гідравлічної системи далі визначають робочу точку (рис.3.7.) , якій відповідає оптимальні значення витрат та тиску при максимальному ККД. В подальшому, при експлуатації такого агрегата його роботу намагаються тримати в певному діапазоні.

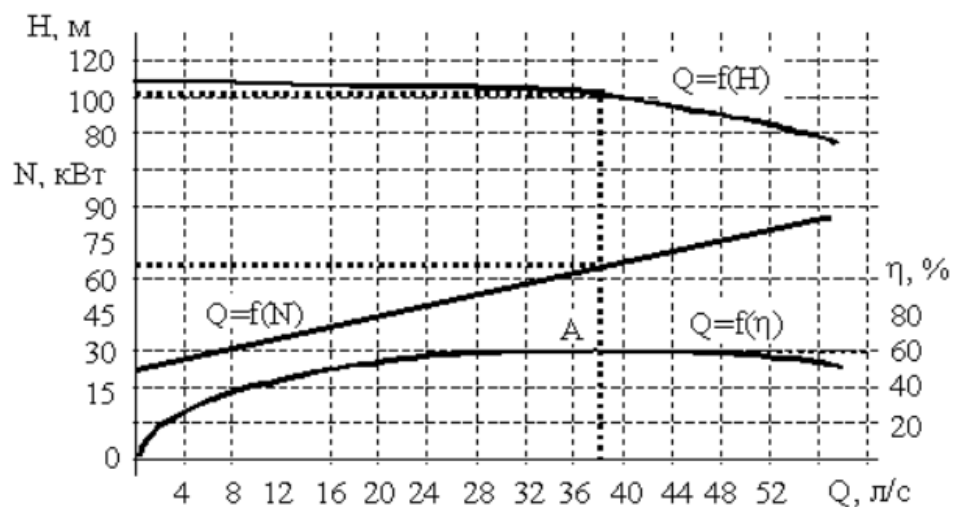


Рис.3.7. Визначення робочої точки насоса ПН-40 за його статичними характеристиками

3.3 Робота відцентрових насосів на зовнішню мережу

У практиці проектування та аналізу режимів роботи насосів використовують метод графоаналітичного розрахунку сумісної роботи системи “насос-мережа”.

Для вирішення поставленої задачі використовується головна робоча характеристику відцентрового насоса, яка може бути представлена у вигляді рівняння:

$$H = a - b * Q^2, \quad (12)$$

де H – тиск насоса, м; a – тиск насоса при нульовій подачі, м; b – коефіцієнт, який враховує конструктивні особливості насоса; Q – витрати насоса, м³/с;

При сумісній роботі насоса та зовнішньої водопровідної мережі встановлюється режим, при якому витрати води та тиск відповідають один одному, тобто тиск, необхідний для подачі води по трубопроводу, буде відповідати тиску створюваним відцентровим насосом. Такий режим можливо визначити, побудувавши сумісні *статичні характеристики насоса та мережі* на одному графіку в однаковому масштабі (рис.3.8.).

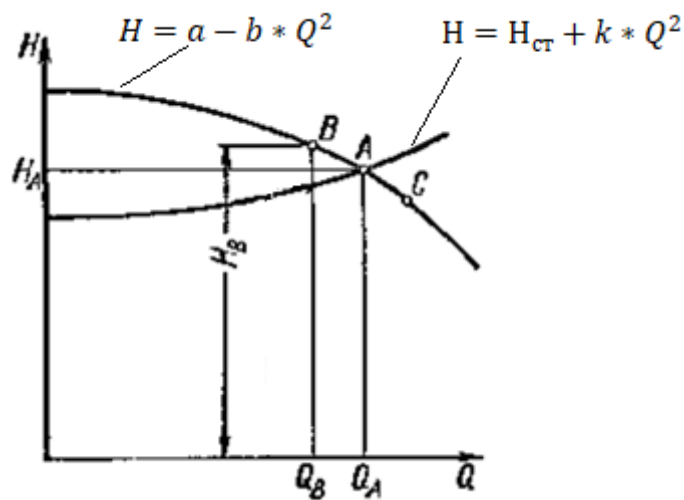


Рис.3.8 Графік сумісної роботи насоса та мережі

Саме суміщення графіку напірної характеристики трубопровідної мережі та робочої характеристики насоса дає реальне уявлення про можливості роботи такої системи в тандемі, а також дає змогу прогнозувати роботу такої гідравлічної системи в промислових системах.

3.4. Побудова напірної характеристики трубопровідної мережі дослідної установки *Festo EduKit PA Advanced*

Як вже згадувалось раніше, для опису трубопровідної гідравлічної мережі необхідно побудувати графік напірної характеристики такої мережі. Так як суто теоретично досить важко точно визначити складові рівняння (5), що характеризують конкретну гідравлічну мережу, для визначення функції, нами було проведено експеримент, що базуються на ряді припущень:

- рівняння витратної характеристики трубопровідної мережі має відповідати характеристичному рівнянню (1);
- миттєві значення витрат та тиску відповідають робочим точкам гідравлічної системи, тобто точками перетину двох графіків, (рис.3.8.);

за наступних умов:

- рідина циркулює по зовнішньому контуру трубопровідної мережі, а всі запірні арматури – відкриті;
- перетікання рідини з приймального резервуару у витратний – вільне;
- зміна напруги живлення ≈ 0.1 [В/с.];

Відповідно до прийнятих припущень та умов проведення експерименту вимірюємо значення H , [бар] та Q , [л./хв.] змінюючи напругу живлення насосної станції *SPX Johnson Circulating pump 24V*.

Результати експериментальних досліджень напірної характеристики трубопровідної мережі подано у вигляді графіку (рис.3.9.).

$$Ql := \begin{pmatrix} 0.61 \\ 1.77 \\ 2.32 \\ 3.23 \\ 3.6 \\ 4.07 \\ 4.47 \\ 4.9 \\ 5.2 \\ 5.57 \end{pmatrix} \quad Hbar := \begin{pmatrix} 0.085 \\ 0.081 \\ 0.086 \\ 0.1 \\ 0.109 \\ 0.122 \\ 0.128 \\ 0.145 \\ 0.148 \\ 0.163 \end{pmatrix}$$

, де Ql – значення витрат рідини, $Hbar$ – відповідне значення напору;

2. Проведемо інтерполяцію отриманих результатів за допомогою функції параболічного сплайну:

$$\begin{aligned} x &:= 0, 0.1.. 6 \\ S1 &:= pspline(Ql, Hbar) \\ f1(x) &:= interp(S1, Ql, Hbar, x) \end{aligned}$$

3. Будуємо теоретичне рівняння напірної характеристики трубопровідної мережі, що відповідає характеристичному (1).

$$H_{teor}(x) := 0.073 + 0.0028 \cdot x^2$$

Як бачимо на рис.3.10 графік теоретичної функції досить точно описує результати експериментальних досліджень, про що може свідчити візуальне накладання теоретичної функції $H_{teor}(x)$ та результатів реальних експериментів $Hbar(Ql)$.

Для дослідження трубопровідної мережі **внутрішнього контуру** проведемо аналогічний експеримент за наступних умов:

- рідина циркулює по внутрішньому контуру трубопровідної мережі;
- зміна напруги живлення ≈ 0.1 [В/с.];

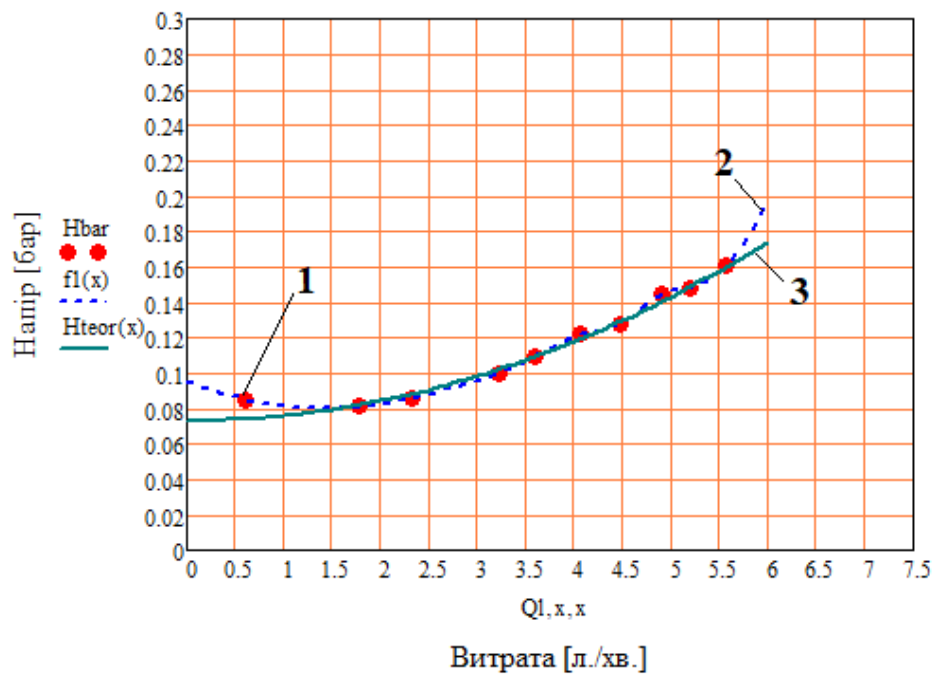


Рис.3.10 Результати досліджень напірної характеристики зовнішнього контуру трубопроводної мережі *Festo EduKit PA Advanced* : 1 – результати експериментальних досліджень; 2 – графік функції параболічного сплайну; 3 – графік теоретичної функції;

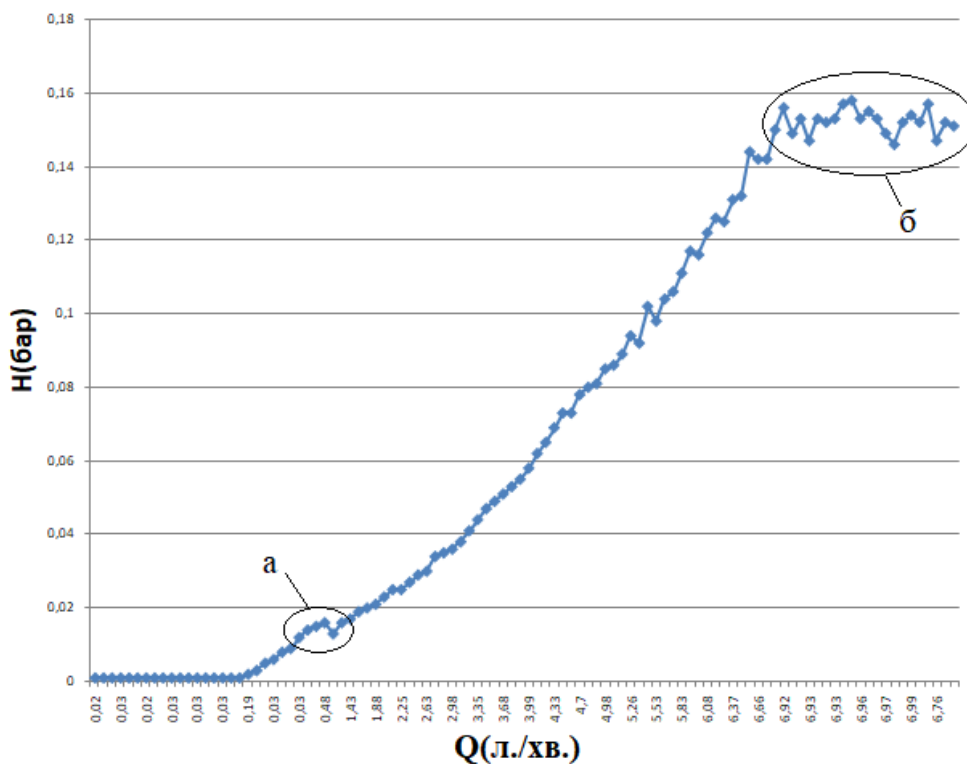


Рис.3.11. Результати експериментальних досліджень напірної характеристики внутрішнього контуру трубопровідної мережі: а – початок руху рідини; б – режим усталеного руху рідини;

Скористаємось середовищем *MathCad* для аналізу отриманих результатів:

1. Створимо вибірку з результатів експериментальних досліджень у вигляді одновимірної матриці:

$$Qls := \begin{pmatrix} 0.9 \\ 1.72 \\ 2.5 \\ 3.78 \\ 4.11 \\ 4.7 \\ 5.39 \\ 6.08 \\ 6.55 \\ 6.97 \end{pmatrix} \quad Hsbar := \begin{pmatrix} 0.013 \\ 0.02 \\ 0.029 \\ 0.053 \\ 0.062 \\ 0.078 \\ 0.092 \\ 0.122 \\ 0.144 \\ 0.149 \end{pmatrix}$$

, де Qls – значення витрат рідини, Hsbar – відповідне значення напору;

2. Проведемо інтерполяцію отриманих результатів за допомогою функції параболічного сплайну:

$$\begin{aligned} xs &:= 0,0.1..7 \\ Ss1 &:= pspline(Qls, Hsbar) \\ fs1(xs) &:= interp(Ss1, Qls, Hsbar, xs) \end{aligned}$$

3. Будуємо теоретичне рівняння напірної характеристики трубопровідної мережі, що відповідає характеристичному (1).

$$Hsteor(xs) := 0.014 + 0.0028 \cdot xs^2$$

Можна впевнитись, що на рис.3.12 графік теоретичної функції досить точно описує результати експериментальних досліджень, про що може свідчити візуальне накладання теоретичної функції $Hsteor(x)$ та результатів

реальних експериментів $Hsbar(Qls)$. Тому наближено можна вважати функцію достовірною.

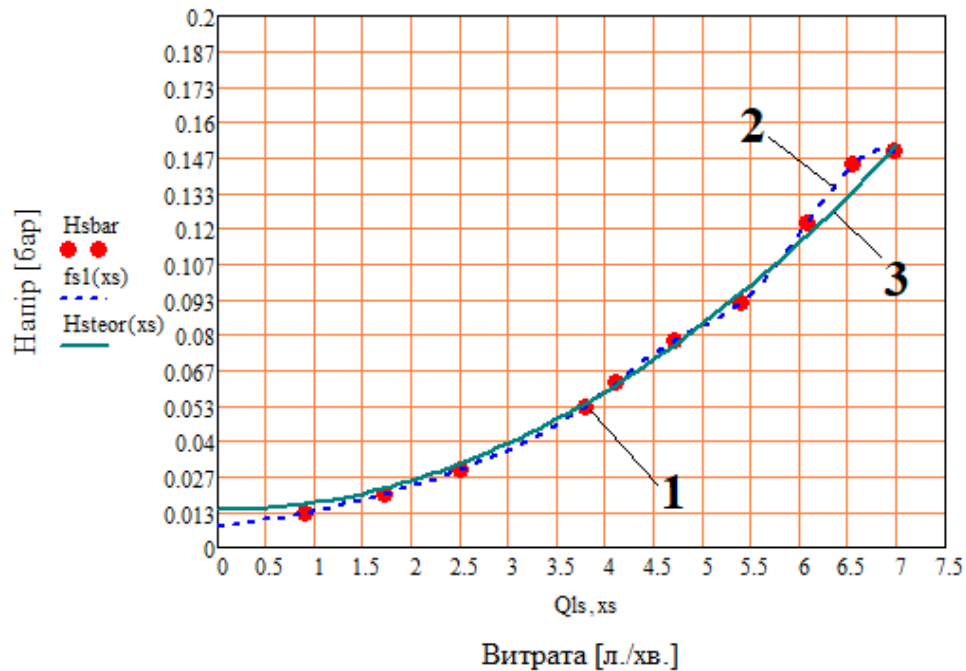


Рис.3.12. Обробка результатів досліджень напірної характеристики внутрішнього контуру трубопроводної мережі *Festo EduKit PA Advanced* :
1 – результати експериментальних досліджень; 2 – графік функції параболічного сплайну; 3 – графік теоретичної функції;

3.5. Побудова робочої характеристики насосної станції *SPX Johnson Circulating pump 24V*

Як зазначалось в розділі 3.3., насосна станція працює в тандемі з трубопроводною мережею, тому вміння визначити робочу характеристику насоса має виключне значення на етапі проектування гідравлічної системи, а також її обслуговуванні.

З метою визначення робочої характеристики насосної станції *SPX Johnson Circulating pump 24V* нами було проведений експеримент відповідно до наступних припущень:

- Рівняння робочої характеристики насосу відповідає характеристичному рівнянню (11);
- миттєві значення витрат та тиску відповідають точками перетину двох графіків, (рис.3.8.);

за умов:

- циркуляція рідини відбуватиметься по зовнішньому контуру;
- контрольні кути повороту запірної арматури : $60^\circ, 40^\circ, 20^\circ, 0^\circ$;
- поворот запірної арматури на наступний контрольний кут відбувається через $\approx 10\text{с}$;
- випробування по закриванню запірної арматури проводимо окремо для кожної напруги живлення: 16В, 18В, 21В;
- вимірювання тиску в мережі проводиться до запірної арматури;

Результати досліджень робочої характеристики насосної станції для досліджуваних напруг живлення подано у вигляді графіку, (рис.3.13.).

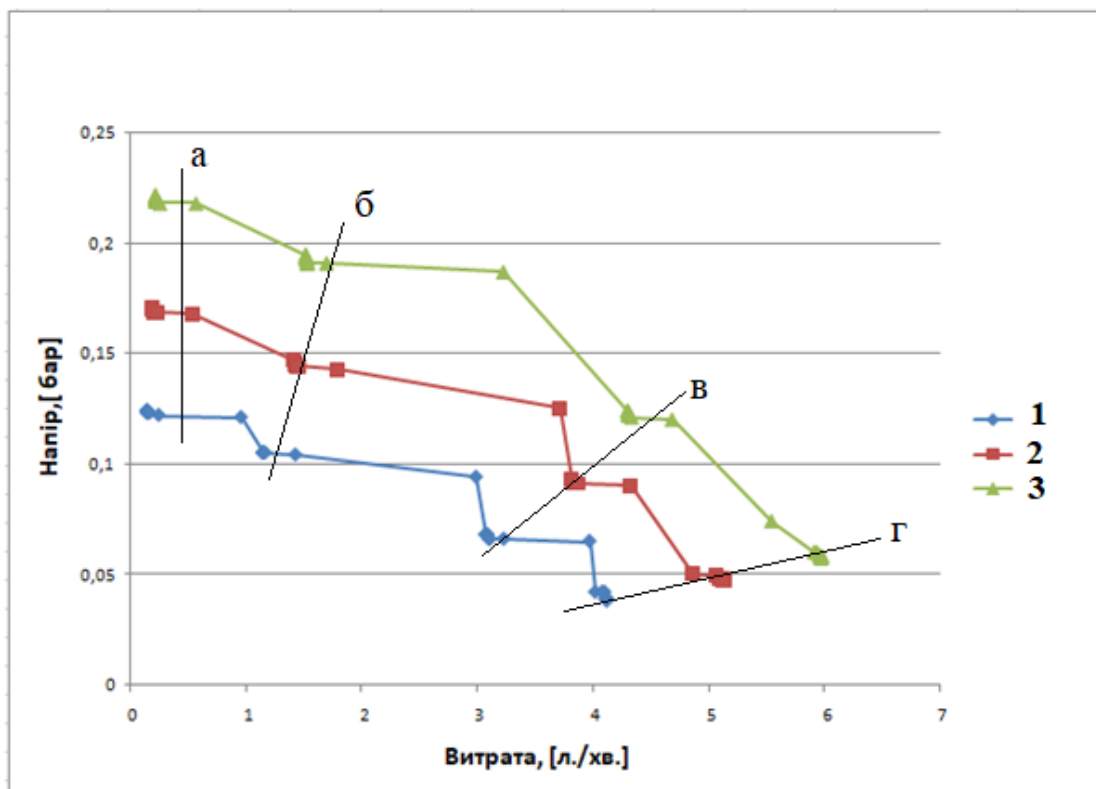


Рис.3.13. Результати експериментальних досліджень насосної станції: графіки (1,2,3) відповідають напрузі живлення двигуна насосної станції (16В,18В, 21В); зони (а,б,в,г) відповідають кутам повороту запірної арматури (60°,40°,20°,0°).

Наступним кроком виконаємо аналіз отриманих експериментальних даних за допомогою математичних інструментів MathCad:

1. Створимо вибірку з результатів експериментальних досліджень при напрузі живлення двигуна насосної станції $U_{\text{жив}} = 21\text{В}$ у вигляді одновимірної матриці:

$$Q11 := \begin{pmatrix} 0 \\ 1.51 \\ 3.22 \\ 4.3 \\ 5.98 \end{pmatrix} \quad Pbar1 := \begin{pmatrix} 0.221 \\ 0.191 \\ 0.187 \\ 0.124 \\ 0.06 \end{pmatrix}$$

, де Q11 – значення витрат рідини, Pbar1 – відповідне значення напору;

2. Проведемо інтерполяцію отриманих результатів за допомогою функції параболічного сплайну:

$$\begin{aligned} X1 &:= Q11^{(0)} & Y1 &:= Pbar1^{(0)} \\ x &:= 0, 0.1.. 6 \\ S1 &:= \text{pspline}(X1, Y1) \\ f1(x) &:= \text{interp}(S1, X1, Y1, x) \end{aligned}$$

3. Будуємо теоретичну функцію робочої характеристики насосної станції, що відповідає характеристичному (11) і графічно суміщуємо з вибіркою отриманих експериментальних даних

$$\begin{aligned} Q &:= 0, 0.1.. 6 \\ H_{\text{теор}}(Q) &:= 0.221 - 0.0048 \cdot Q^2 \end{aligned}$$

Аналогічним чином опрацьовуємо результати досліджень для напруг живлення двигуна насосної станції $U_{жив} = 18В$ та $U_{жив} = 16В$.

В результаті отримаємо зведений графік, (рис.3.14.), де бачимо, що графіки теоретичних функцій наближено описують результати відповідних експериментальних досліджень, про що може свідчити візуальне накладання функцій $H_{теор}(Q)$, $H_{теор1}(Q)$, $H_{теор2}(Q)$ та результатів реальних експериментів $Y1(X1)$, $Y2(X2)$, $Y3(X3)$. Тому наближено можна вважати отримані теоретичні рівняння такими, що описують робочу характеристику насосної станції.

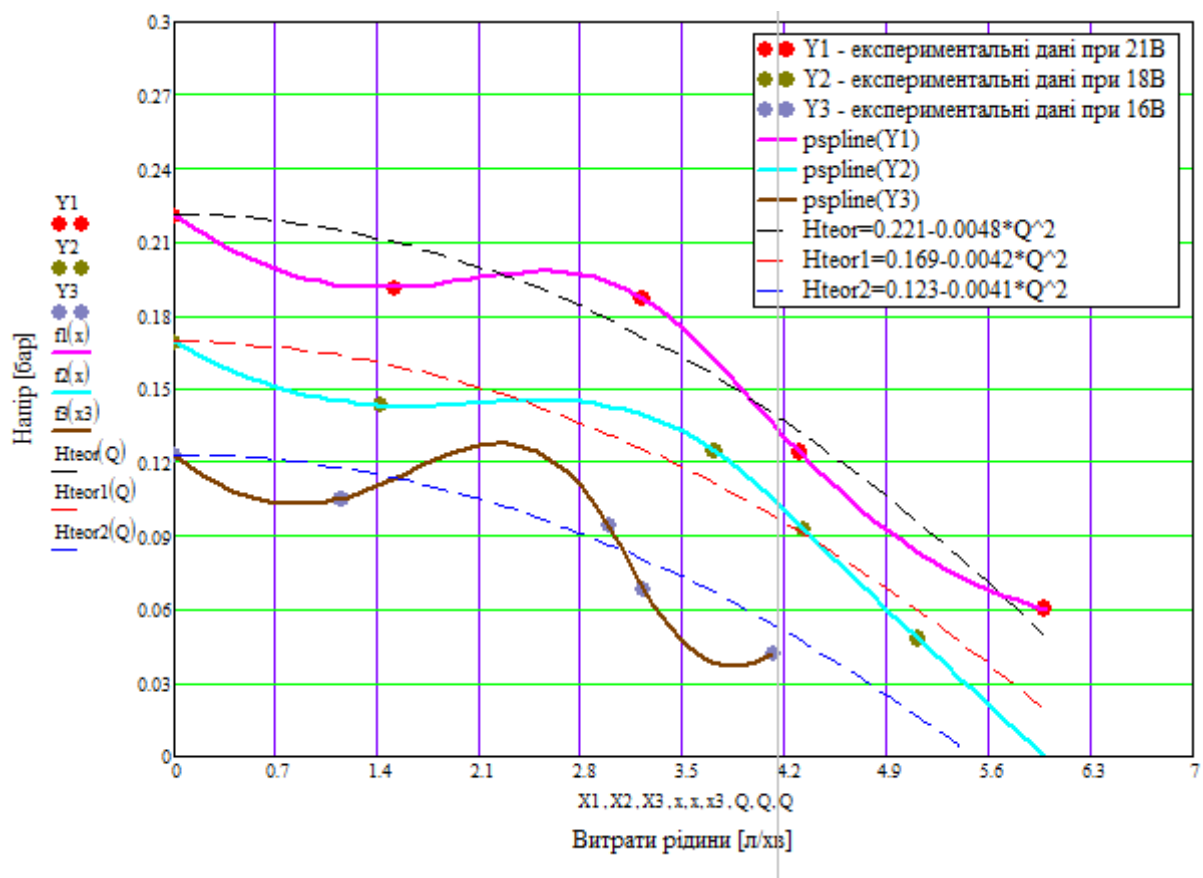


Рис.3.14. Обробка результатів експериментальних досліджень робочих характеристик насосної станції *SPX Johnson Circulating pump 24V*: $Y1, Y2, Y3$ – результати експериментальних досліджень при напругах живлення насосної станції (21В, 18В, 16В) відповідно; $pspline$ – графіки параболічного сплайну по значенням $Y1, Y2, Y3$; $H_{теор}, H_{теор1}, H_{теор2}$ – графіки теоретичної робочої характеристики насосних станцій при напругах живлення (21В, 18В, 16В);

Висновки до розділу №3:

1. З отриманих результатів досліджень напірної характеристики трубопроводної мережі зовнішнього контуру та побудованого графіку залежності $H = f(Q)$ (рис.3.9.), можна зробити наступні висновки:

- стабільний рух рідини $Q = 0.35-0.61$ л./хв. встановлюється при тиску $H = 0.083-0.085$ бар, (рис.3.9, область (а));
- при подальшому збільшенні напруги живлення двигуна насосної станції спостерігаємо ріст величини витрат із збільшенням тиску, до максимального значення напору $H = 0.163$ бар., та витрат $Q = 5.57$ л./хв., (рис.3.9, область (б));
- (рис.3.9, область(в)) спостерігаємо стрімке падіння напору та витрат, що пов'язане із критичним зменшенням рівня рідини у витратному резервуарі;

2. З отриманих результатів досліджень робочої характеристики насосної станції, що подані у вигляді графіків (рис.3.13., рис.3.14.), можна зробити наступні висновки:

- із збільшенням напруги живлення двигуна насосної станції, функція напору $H = f(Q)$ змінюється;
- при повному закритті запірної арматури (60°) спостерігається максимальне значення тиску в системі.
- із відкриттям запірної арматури спостерігаємо поступове падіння тиску та одночасний ріст витрат в системі, аж до його максимального значення, що відповідає повному відкриттю запірної арматури (0°);

Розділ 4. Експериментальні дослідження витратної характеристики гідравлічної мехатронної системи Festo EduKit PA Advanced

Для побудови математичної моделі (функції), яка б найточніше описувала витратну характеристику гідравлічної системи, як складову системи подачі рідкого харчового продукту в технологічному процесі дозування, скористаємося методикою виконання багатофакторного експерименту.

Суть проведення такого експерименту полягає в тому, щоб виявити, які зовнішні і внутрішні фактори мають суттєвий вплив на параметр оптимізації, який кількісний ступінь цього впливу. Іншими словами, необхідно знайти залежність цього параметра оптимізації від усіх суттєвих факторів (знайти модель).

4.1 Обґрунтування вибору факторів

При дослідженні процесу переміщення рідких харчових продуктів по трубопроводам було здійснено огляд конструкцій дозувальних систем (компанії KHS, Krones), зокрема систем подачі рідкого харчового продукту, літературних джерел, а також беручи до уваги особливості конструкції установки Festo EduKit PA Advanced, на основі чого для проведення багатофакторного експерименту були вибрані наступні найсуттєвіші фактори:

- H – висота підйому рідини в системі: 0,2м ; 0,76м внутрішній та зовнішні контури;

- α – кут повороту запірної арматури: 0град. – повністю відкритий; 30град. – наполовину закритий;
- $U_{жив}$ – напруга живлення: 13,7В – мінімальна напруга при якій спостерігається циркуляція рідини в системі; 21В – максимальне значення напруги живлення двигуна;

Висота підйому рідини в системі H [м] – це фізична величина, що визначає кількість енергії яку необхідно передати 1Н рідини для її підняття на задану висоту (рис4.1.). З данного визначення можна зробити висновок, що при зміні висоти піднімання рідини змінюється і робота, яку необхідно виконати для створення висотного напору.

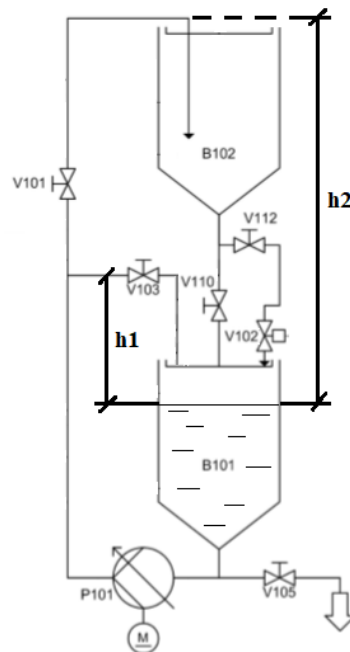


Рис.4.1 Схема циркуляції рідкого харчового продукту по внутрішньому і зовнішньому контурах: $h1$ – 0,2м; $h2$ – 0,76м;

Висотний або геометричний напір в трубопровідній мережі виступає своєрідним енергетичним бар'єром який необхідно подолати для початку переміщення рідини в мережі. Саме тому при побудові напірної характеристики мережі значення геометричного напору є суттєвою складовою від якої залежить величина витрат рідини в системі.

Кут повороту запірної арматури α [град] – при необхідності регулювання величини витрат в гідравлічних системах застосовують метод, який досить широко застосовується на виробництві і побуті, що називається дроселювання. Сутність якого полягає у втраті енергії води при різкому зменшенні площі прохідного перерізу трубопровода по якому рухається рідина. В дослідній установці Festo EduKit PA-Process в якості дроселю виступає запірна арматура JohnGuest, (рис.4.2) , прохідна площа перерізу якої залежить від кута повороту ручки. Нами було експериментально визначено, робочі межі повороту ручки $\alpha = 0 - 60^\circ$ а також, що при повороті ручки запірної арматури на кут $\alpha = 30^\circ$, площа прохідного перерізу зменшується вдвічі.

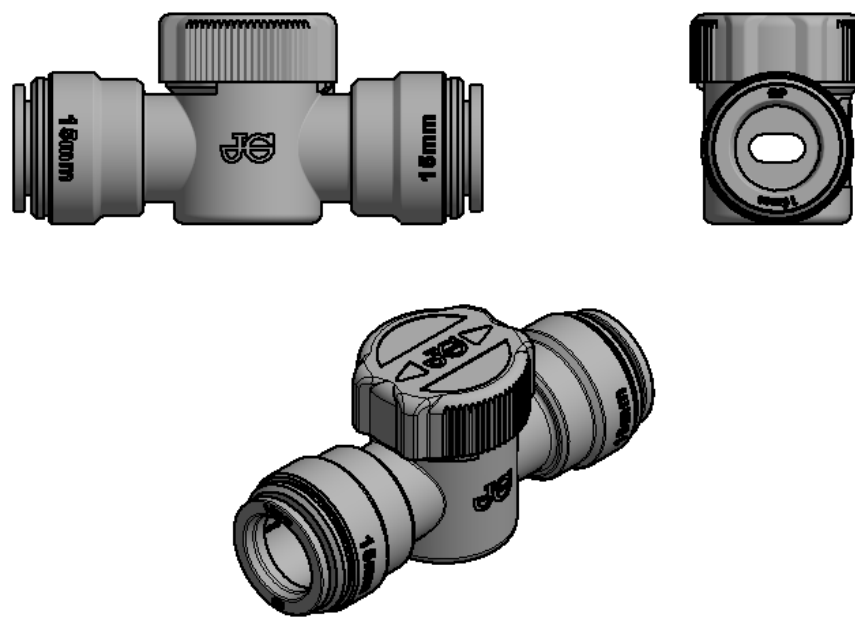


Рис.4.2 Запірна арматура JohnGuest 15ESOT

Напруга живлення двигуна насосної станції $U_{жив}[В]$ – це напруга, що подається на обмотки двигуна постійного струму, зі збільшенням напруги живлення двигуна кутова швидкість вала двигуна насосної станції збільшиться пропорційно, відповідно до формули:

$$\omega = \frac{U_{жив}}{В} \quad (13),$$

де B – це величина магнітного потоку що створюється в обмотках збудження;
 ω – кутова швидкість обертання вала двигуна постійного струму;
 В свою чергу збільшення кутової швидкості вала двигуна збільшує відцентрові сили, що діють на рідину при потраплянні її на робоче колесо насосу і тим більша енергія передається рідині, відповідно зростають витратні характеристики.

4.2 Статистичне опрацювання результатів.

Визначаємо кількість дослідів повного багатofакторного експерименту:

$$N = 2^n = 2^3 = 8,$$

де n – кількість незалежних найсуттєвіших факторів.

Плануємо кількість дублюючих дослідів, $m=3$.

Нормалізуємо вихідне рівняння регресії, тобто перетворюємо змінні x_i в безрозмірні нормалізовані змінні z_i

$$z_i = \frac{x_i - x_i^0}{\Delta x} \quad (14),$$

де x_i – (+1) або (-1) рівень варіювання i -ого фактору;

x_i^0 – 0-рівень варіювання i -ого фактору ($x_i^0 = \frac{1}{2} \cdot (x_{iB} + x_{iH})$);

Δx – інтервал варіювання i -ого фактору ($\Delta x = \frac{1}{2} \cdot (x_{iB} - x_{iH})$);

x_{iB} , x_{iH} – відповідно верхній і нижній рівні варіювання.

Нормальне рівняння регресії набуває виду:

$$y = b_0 + b_1 \cdot z_1 + b_2 \cdot z_2 + b_3 \cdot z_3 + b_4 \cdot z_4 + b_5 \cdot z_1 \cdot z_2 + b_6 \cdot z_1 \cdot z_3 + b_7 \cdot z_1 \cdot z_4 + b_8 \cdot z_2 \cdot z_3 + b_9 \cdot z_2 \cdot z_4 + b_{10} \cdot z_3 \cdot z_4 + b_{11} \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot z_3 + b_{12} \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot z_4 + b_{13} \cdot z_2 \cdot z_3 \cdot z_4 + b_{14} \cdot z_1 \cdot z_3 \cdot z_4 + b_{15} \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot z_3 \cdot z_4 \quad (15)$$

де $b_0, b_1, b_2, b_3 \dots b_{15}$ – коефіцієнти регресії.

За тою причиною, що нормалізовані змінні $z_1, z_2 \dots$ можуть набувати значень (+1) чи (-1), матриця плану в своїх рядках вміщує тільки знаки (+1) чи (-1). Фіктивна змінна z_0 у всіх рядках матриці має рівень (+1).

Складаємо матрицю плану активного експерименту, вона вміщує N штук рядків та $n+1$ стовпців (перший стовпець заповнюємо символами нижнього рівня вимірювань та (+) для фіксованої z_0 , а наступні рядки заповнюємо символами варіювання кожного фактору за правилом – частота зміни знаку кожного наступного рівня варіювання удвічі менша за частоту зміни знаку попереднього ряду.

Заповнюємо матрицю активного плану експерименту:

Таблиця 4.1.

Матриця багатofакторного експерименту

	x_1 (H,[м])	x_2 (α ,[град])	x_3 ($U_{жив}$, [В])
0-рівень	0,48	15	17,35
Крок варіювання Δx	0,28	15	3,65
Верхній рівень (+1)	0,76	30	21
Нижній рівень (-1)	0,2	0	13,7

Складаємо план експерименту:

Таблиця 4.2.

План багатofакторного експерименту

№	z_0	z_1	z_2	z_3	$z_1 z_2$	$z_1 z_3$	$z_2 z_3$	$z_1 z_2 z_3$	Y_1	Y_2	Y_3	\vec{Y}
1	+	+	+	+	+	+	+	+	5,38	5,56	5,54	5,49

2	+	+	+	-	+	-	-	-	2,24	2,26	2,22	2,24
3	+	+	-	+	-	+	-	-	7,84	7,8	7,82	7,82
4	+	+	-	-	-	-	+	+	3,14	2,66	2,7	2,83
5	+	-	+	+	-	-	+	-	5,52	5,5	5,56	5,53
6	+	-	+	-	-	+	-	+	3,6	3,62	3,61	3,61
7	+	-	-	+	+	-	-	+	9,02	9,04	9,06	9,04
8	+	-	-	-	+	+	+	-	5,54	5,6	5,58	5,57

За вимогами матриці проводимо експеримент варіюючи кожну змінну за відповідністю до матричної послідовності, але послідовність номерів змінюємо за таблицею випадкових чисел.

4.3 Обробка дослідних даних

Перевіряємо однорідність дисперсії середніх значень за експериментальними даними (відтворюваність отриманих дослідних даних):

$$S_{ij}^2 = (m - 1)^{-1} \sum_{l=1}^m (y_{lj} - \bar{y}_{lj})^2 \quad (16)$$

l – номер серії дослідів,

m – загальна кількість дублів

$$S_1^2 = (3-1)^{-1}[(5,49-5,38)^2 + (2,24-2,24)^2 + (7,82-7,84)^2 + (2,83-3,14)^2 + (5,52-5,52)^2 + (3,61-3,6)^2 + (9,04-9,02)^2 + (5,57-5,54)^2] = 0,055;$$

$$S_2^2 = (3-1)^{-1}[(5,49-5,56)^2 + (2,24-2,26)^2 + (7,82-7,8)^2 + (2,83-2,66)^2 + (5,52-5,5)^2 + (3,61-3,62)^2 + (9,04-9,04)^2 + (5,57-5,6)^2] = 0,018$$

$$S_3^2 = (3-1)^{-1}[(5,49-5,54)^2 + (2,24-2,22)^2 + (7,82-7,82)^2 + (2,83-2,7)^2 + (5,52-5,56)^2 + (3,61-3,61)^2 + (9,04-9,06)^2 + (5,57-5,58)^2] = 0,011$$

$$\sum S_{ij}^2 = 0,084$$

Візуально визначаємо найбільше значення, що дорівнює 0,055.

$$G_p = \frac{S_{ij \max}^2}{\sum S_{ij}^2} = \frac{0,055}{0,084} = 0,655$$

Визначаємо степені свободи, які є аргументами для теоретичного визначення критерія Кохрена:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1 = (m-1) = 3-1 = 2 \\ f_2 = N = 8 \end{array} \right\}$$

За цими значеннями визначаємо по табл. критичне значення критерія Кохрена: $G_{kp} = 0,8159$

Порівнюємо розрахункове та критичне значення критерія Кохрена:

$G_p = 0,655 < G_{kp} = 0,8159$, це означає, що оцінки дисперсії є однорідними, а результат – відтворюваний.

Визначаємо загальну дисперсію – похибку досліджуваності:

$$S_0^2 = \sum_1^m S_y^2 / N = \frac{0,084}{8} = 0,0105$$

4.4 Перевірка значущості коефіцієнтів регресії

Слід зазначити, що вплив одного з факторів більше впливає на зміну стану системи, ніж інший. Отже потрібно на основі результатів дослідів визначити коефіцієнти лінійної регресії.

Визначаємо оцінки коефіцієнтів рівняння регресії та перевіряємо їх вплив на досліджувану функцію:

$$Z_i = \frac{x_i - x_{0i}}{\Delta x_i} \quad (17)$$

$$b_i = N^{-1} \sum_1^N (z_i \bar{y}_j) \quad (18),$$

де i – номер фактора

$$b_0 = \frac{(+1) \cdot \bar{y}_1 + (+1) \cdot \bar{y}_2 + (+1) \cdot \bar{y}_3 + (+1) \cdot \bar{y}_4 + (+1) \cdot \bar{y}_5 + (+1) \cdot \bar{y}_6 + (+1) \cdot \bar{y}_7 + (+1) \cdot \bar{y}_8}{8}$$

$$b_1 = \frac{(+1) \cdot \bar{y}_1 + (-1) \cdot \bar{y}_2 + (+1) \cdot \bar{y}_3 + (-1) \cdot \bar{y}_4 + (+1) \cdot \bar{y}_5 + (-1) \cdot \bar{y}_6 + (+1) \cdot \bar{y}_7 + (-1) \cdot \bar{y}_8}{8}$$

$$b_2 = \frac{(+1) \cdot \bar{y}_1 + (+1) \cdot \bar{y}_2 + (-1) \cdot \bar{y}_3 + (-1) \cdot \bar{y}_4 + (+1) \cdot \bar{y}_5 + (+1) \cdot \bar{y}_6 + (-1) \cdot \bar{y}_7 + (-1) \cdot \bar{y}_8}{8}$$

$$b_3 = \frac{(+1) \cdot \bar{y}_1 + (+1) \cdot \bar{y}_2 + (+1) \cdot \bar{y}_3 + (+1) \cdot \bar{y}_4 + (-1) \cdot \bar{y}_5 + (-1) \cdot \bar{y}_6 + (-1) \cdot \bar{y}_7 + (-1) \cdot \bar{y}_8}{8}$$

$$b_4 = \frac{(+1) \cdot \bar{y}_1 + (+1) \cdot \bar{y}_2 + (-1) \cdot \bar{y}_3 + (-1) \cdot \bar{y}_4 + (-1) \cdot \bar{y}_5 + (-1) \cdot \bar{y}_6 + (+1) \cdot \bar{y}_7 + (+1) \cdot \bar{y}_8}{8}$$

$$b_5 = \frac{(+1) \cdot \bar{y}_1 + (-1) \cdot \bar{y}_2 + (+1) \cdot \bar{y}_3 + (-1) \cdot \bar{y}_4 + (-1) \cdot \bar{y}_5 + (+1) \cdot \bar{y}_6 + (-1) \cdot \bar{y}_7 + (+1) \cdot \bar{y}_8}{8}$$

$$b_6 = \frac{(+1) \cdot \bar{y}_1 + (-1) \cdot \bar{y}_2 + (-1) \cdot \bar{y}_3 + (+1) \cdot \bar{y}_4 + (+1) \cdot \bar{y}_5 + (-1) \cdot \bar{y}_6 + (-1) \cdot \bar{y}_7 + (+1) \cdot \bar{y}_8}{8}$$

$$b_7 = \frac{(+1) \cdot \bar{y}_1 + (-1) \cdot \bar{y}_2 + (-1) \cdot \bar{y}_3 + (+1) \cdot \bar{y}_4 + (-1) \cdot \bar{y}_5 + (+1) \cdot \bar{y}_6 + (+1) \cdot \bar{y}_7 + (-1) \cdot \bar{y}_8}{8}$$

$$b_0 = \frac{1}{8}[5.49 + 2.24 + 7.82 + 2.83 + 5.52 + 3.61 + 9.04 + 5.57] = 5.27$$

$$b_1 = \frac{1}{8}[5.49 - 2.24 + 7.82 - 2.83 + 5.52 - 3.61 + 9.04 - 5.57] = 1.7$$

$$b_2 = \frac{1}{8}[5.49 + 2.24 - 7.82 - 2.83 + 5.52 + 3.61 - 9.04 - 5.57] = -1.05$$

$$b_3 = \frac{1}{8}[5.49 + 2.24 + 7.82 + 2.83 - 5.52 - 3.61 - 9.04 - 5.57] = -0.67$$

$$b_4 = \frac{1}{8}[5.49 + 2.24 - 7.82 - 2.83 - 5.52 - 3.61 + 9.04 + 5.57] = 0.32$$

$$b_5 = \frac{1}{8}[5.49 - 2.24 + 7.82 - 2.83 - 5.52 + 3.61 - 9.04 + 5.57] = 0.36$$

$$b_6 = \frac{1}{8}[5.49 - 2.24 - 7.82 + 2.83 + 5.52 - 3.61 - 9.04 + 5.57] = -0.41$$

$$b_7 = \frac{1}{8}[5.49 - 2.24 - 7.82 + 2.83 - 5.52 + 3.61 + 9.04 - 5.57] = 0.02$$

Отже, рівняння регресії набуває вигляду:

$$\bar{y} = 5.27 + 1.7z_1 - 1.05z_2 - 0.67z_3 + 0.32z_1z_2 + 0.36z_1z_3 - 0.41z_2z_3 + 0.02z_1z_2z_3$$

Серед визначених коефіцієнтів можуть бути статично незначущі. Вони не несуть корисної інформації про об'єкт дослідження і можуть бути виключені з рівняння регресії. Для перевірки значущості розраховують:

$$S_{\beta_i}^2 = \frac{S_0^2}{N} \quad (19),$$

де : $S_0^2 = 0.0105$

$$S_{\beta_i}^2 = \frac{0.0105}{8} = 0.0013$$

Визначаємо середньоарифметичне відхилення:

$$S_{\beta_i} = \sqrt{S_{\beta_i}^2} = 0.036$$

Визначаємо для кожної β_i розрахункове значення критерія Стюдента:

$$t_{\beta_i} = \frac{|\beta_i|}{S_{\beta_i}} \quad (20)$$

$$t_{\beta_0} = \frac{|5.27|}{0.036} = 146.38; \quad t_{\beta_1} = \frac{|1.7|}{0.036} = 47.22$$

$$t_{\beta_2} = \frac{|-1.05|}{0.036} = 29.16, \quad t_{\beta_3} = \frac{|-0.67|}{0.036} = 18.61$$

$$t_{\beta_4} = \frac{|0.32|}{0.036} = 8.88, \quad t_{\beta_5} = \frac{|0.36|}{0.036} = 10$$

$$t_{\beta_6} = \frac{|-0.41|}{0.036} = 11.38, \quad t_{\beta_7} = \frac{|0.02|}{0.036} = 0.55$$

Визначаємо критичне значення за табл. за аргументом степені свободи і рівні значущості $\alpha=0,05$:

$$f_t = N \cdot (m-1) = 8 \cdot (3-1) = 16 \Rightarrow t_{кр} = 2,77$$

Якщо $t_p < t_{кр}$, ця оцінка коефіцієнта β_i є незначуща і цей коефіцієнт викреслюється з рівняння.

Запишемо рівняння регресії у вигляді:

$$\bar{y} = 5.27 + 1.7z_1 - 1.05z_2 - 0.67z_3 + 0.32z_1z_2 + 0.36z_1z_3 - 0.41z_2z_3$$

$$\hat{y}_1 = (+1)5.27 + (+1)1.7 - (+1)1.05 - (+1)0.67 + (+1)0.32 + (+1)0.36 - (+1)0.41 + (+1)0.02 = 5.54$$

$$\hat{y}_2 = (+1)5.27 + (+1)1.7 - (+1)1.05 - (-1)0.67 + (+1)0.32 + (-1)0.36 - (-1)0.41 + (-1)0.02 = 6.94$$

$$\hat{y}_3 = (+1)5.27 + (+1)1.7 - (-1)1.05 - (+1)0.67 + (-1)0.32 + (+1)0.36 - (-1)0.41 + (-1)0.02 = 7.78$$

$$\hat{y}_4 = (+1)5.27 + (+1)1.7 - (-1)1.05 - (-1)0.67 + (-1)0.32 + (-1)0.36 - (+1)0.41 + (+1)0.02 = 7.62$$

$$\hat{y}_5 = (+1)5.27 + (-1)1.7 - (+1)1.05 - (+1)0.67 + (-1)0.32 + (-1)0.36 - (+1)0.41 + (-1)0.02 = 0.74$$

$$\hat{y}_6 = (+1)5.27 + (-1)1.7 - (+1)1.05 - (-1)0.67 + (-1)0.32 + (+1)0.36 - (-1)0.41 + (+1)0.02 = 3.66$$

$$\hat{y}_7 = (+1)5.27 + (-1)1.7 - (-1)1.05 - (+1)0.67 + (+1)0.32 + (-1)0.36 - (-1)0.41 + (+1)0.02 = 4.34$$

$$\hat{y}_8 = (+1)5.27 + (-1)1.7 - (-1)1.05 - (-1)0.67 + (+1)0.32 + (+1)0.36 - (+1)0.41 + (-1)0.02 = 5.54$$

4.5 Перевірка адекватності рівняння регресії (за критерієм Фішера)

Перевірка моделі з урахуванням значущих і незначущих коефіцієнтів регресії називається перевіркою адекватності моделі.

Розглянемо дисперсію яка показує розкид дослідних даних змінної відносно тих значень змінної, які передбачені отриманим лінійним рівнянням регресії.

Ця дисперсія називається дисперсією адекватності і розраховується за формулою:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N |y - \hat{y}|^2}{N - N'} \quad (21),$$

де N' – число значущих коефіцієнтів регресії;

\hat{y} – значення вихідного параметру, що отримане з рівняння регресії.

Для подальших розрахунків складемо допоміжну таблицю

Значення вихідного параметру

№	\bar{y}	\hat{y}	$\bar{y} - \hat{y}$	$(\bar{y} - \hat{y})^2$
1	5.49	5.54	-0.046	0.0021
2	2.24	6.94	-4.7	22.09
3	7.82	7.78	0.04	0.0016
4	2.83	7.62	-4.78	22.91
5	5.52	0.74	4.78	22.91
6	3.61	3.66	-0.05	0.0025
7	9.04	4.34	4.7	22.09
8	5.57	5.54	0.03	0.001

4.6 Математично-статистичне рівняння витратної характеристики гідравлічної мехатронної системи

Для подальшого використання отриманої математичної моделі потрібно отримати рівняння регресії для натуральних змінних.

Для переходу до натуральних значень факторів використаємо формули:

$$z_1 = \frac{x_1 - x_1^0}{h_1}; z_2 = \frac{x_2 - x_2^0}{h_2}; z_3 = \frac{x_3 - x_3^0}{h_3} \quad (22),$$

де x_1, x_2, x_3 – натуральне значення фактору;

x_1^0, x_2^0, x_3^0 – 0-рівень варіювання фактору;

h_1, h_2, h_3 – інтервал варіювання фактору.

Підставивши значення, отримаємо:

$$z_1 = \frac{x_1 - 0.48}{0.28}; \quad z_2 = \frac{x_2 - 15}{15} = \frac{x_2}{15} - 1; \quad z_3 = \frac{x_3 - 17.35}{3.65};$$

Тоді рівняння регресії буде мати вигляд:

$$\bar{y} = 5.27 + 1.7z_1 - 1.05z_2 - 0.67z_3 + 0.32z_1z_2 + 0.36z_1z_3 - 0.41z_2z_3$$

$$Q = 5.27 + 1.7\left(\frac{H - 0.48}{0.28}\right) - 1.05\left(\frac{\alpha}{15} - 1\right) - 0.67\left(\frac{U_{жив} - 17.35}{3.65}\right) + \\ + 0.32\left(\frac{H - 0.48}{0.28}\right)\left(\frac{\alpha}{15} - 1\right) + 0.36\left(\frac{H - 0.48}{0.28}\right)\left(\frac{U_{жив} - 17.35}{3.65}\right) - 0.41\left(\frac{\alpha}{15} - 1\right)\left(\frac{U_{жив} - 17.35}{3.65}\right)$$

Після спрощення отримаємо математично-статистичну залежність витрат рідини в гідравлічній системі від напору (H), напруги живлення двигуна насосної станції ($U_{жив}$) та кута повороту запірної арматури (α):

$$Q = 8,18 + 1,75 \cdot H + 0,023 \cdot \alpha - 0,236 \cdot U_{жив} + 0,076 \cdot H \cdot \alpha + 0,352 \cdot H \cdot U_{жив} - 0,007 \cdot \alpha \cdot U_{жив}$$

Висновки до розділу №4:

1. В результаті підготовки до проведення багатофакторного експерименту нами було визначено :
 - найсуттєвіші фактори, що впливають на величину витрат в системі;
 - межі варіювання найсуттєвіших факторів;
 - послідовність та число необхідних випробувань;
2. В процесі обробки результатів багатофакторного експерименту було визначено рівняння регресії та значення параметрів рівняння регресії методом найменших квадратів, перевірена адекватність отриманих рівнянь, та визначені найбільш значущі коефіцієнти даного рівняння.
3. Проведені експериментальні дослідження підтвердили, що проведення багатофакторного експерименту для дослідження гідравлічних мехатронних систем із застосуванням електронних датчиків сигналів та ПЛК забезпечує високу точність вимірювань, а також мінімізує похибки вимірювань на етапі проведення експерименту.
4. В результаті проведення багатофакторного експерименту нами було отримано рівняння математично-статистичної моделі, що може бути використане для опису витратної характеристики даної гідравлічної системи.

Розділ 5. Експериментальні дослідження енергетичних витрат гідравлічної мехатронної системи в процесі дозування рідкої харчової продукції.

Як вже зазначалось у попередніх розділах досліджувана установка **Festo EduKit PA Advanced** (Рис.2.1) побудована за модульним принципом, який дозволяє масштабувати всю систему за рахунок інтеграції в її структуру сумісних мехатронних модулів.

Для подальшого дослідження енергетичних витрат даної установки в режимі імітації процесу дозування рідкої харчової продукції нами була проведена модернізація даної установки.

Необхідність модернізації мехатронної системи викликана наступними факторами:

1. Інтерфейсний модуль **EasyPort** забезпечує виключно живлення апаратної частини та комунікацію системи з ПК за допомогою програмного забезпечення **FluidLab-PA process**. Таким чином обробка даних відбувається на рівні центрального процесора ПК, а функціональні можливості такої мехатронної системи обмежені програмним забезпеченням.
2. Додавання в систему додаткового функціонального мехатронного модуля не передбаченого програмним забезпеченням потребує окремого програмного забезпечення. Тому при необхідності додавання декількох мехатронних модулів вони мають бути сумісними, а саме налаштування може бути тривалим процесом.

5.1. Модернізація мехатронної системи

Беручи за основу попередню модель дослідної установки ми модернізували мехатронну систему на основі ПЛК SIEMENS S7-1500 (рис.5.0 поз.1.). Для можливості дослідження енергетичних витрат та подальшого аналізу зібраних даних в даній мехатронній системі нами було інтегровано ватметр (поз.2) та панель людино-машинного інтерфейсу (поз.3).

Конфігурація, налаштування та програмування ПЛК, НМІ- панелі здійснювалось за допомогою програмного забезпечення TIA Portal v15.1 та WinCC Advanced.

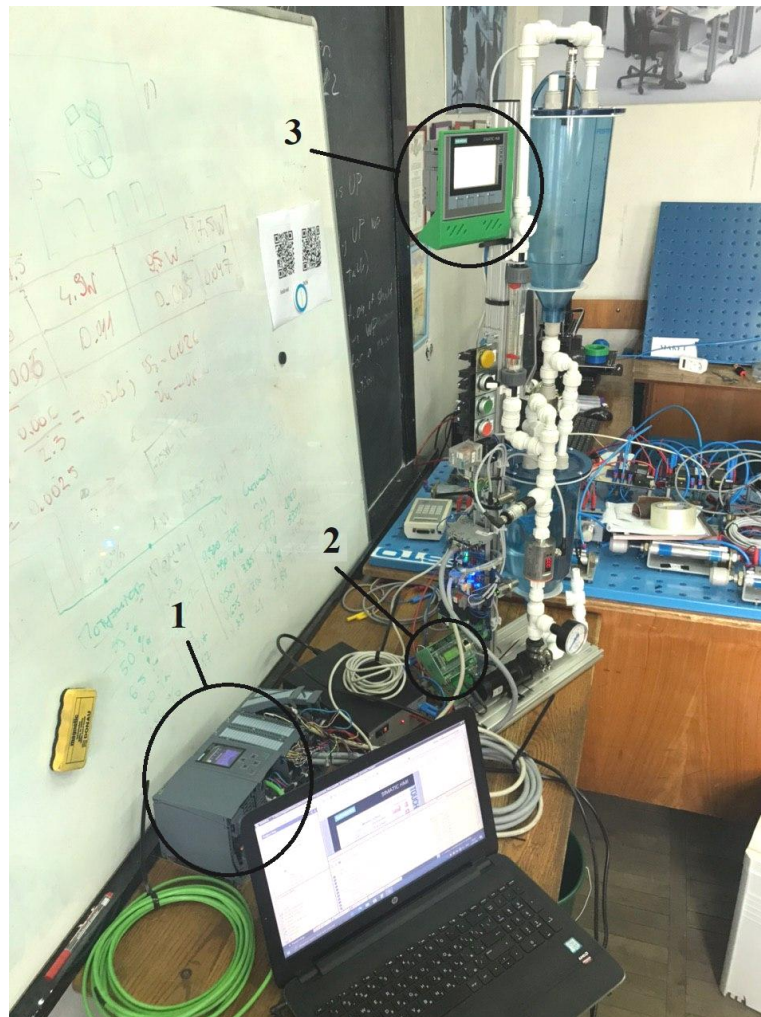


Рис.5.0. Модернізація дослідної установки **Festo EduKit PA Advanced**:
1 – ПЛК (Siemens S7-1500), 2 – ватметр (Adiro DC wattmeter), 3 – людино-машинний інтерфейс (KTR400 comfort)

Програмно-логічний контролер

Центральним елементом модернізованої мехатронної системи звійсно є ПЛК який можна поправу вважати «мозком» машини, саме цей компонент дозволяє виконувати найрізноманітніші завдання по збору та обробці інформації в промислових автоматизованих системах, а також створенні керуючих дій на об'єкти керування. Важливо відмітити виключно важливу роль цих пристроїв в сучасних тенденціях розвитку промисловості (Industry 4.0 , Lean Manufacturing, Sustainable Manufacturing).

На сьогоднішній день ПЛК компанії SIEMENS користуються високою популярності при вирішенні технологічних задач, все частіше на виробництвах можна побачити контролери найновішого сімейства S7-1500 (рис.5.1.), які безумовно є лідерами в швидкодії виконання операцій, ефективності та зручності в експлуатації.



Рис.5.1. Сімейство контролерів S7-1500 Siemens

Комплектація використаного в нашому проекті ПЛК (рис.5.2.) складається з наступних модулів :

- Блок живлення, (поз.1) PM 190W 120/230VAC;
- Блок центрального процесора, (поз.2) CPU 1516F-3 PN/DP;
- Блок дискретних входів, (поз.3) DI 32x24VDC HF;
- Блок дискретних виходів, (поз.4) DQ 32x24VDC/0.5A HF;
- Блок аналогових входів, (поз.5) AI 8xU/I/RTD/TC ST;
- Блок аналогових виходів, (поз.6) AQ 4xU/I ST;

За необхідності, використаний CPU дозволяє розшири кількість послідовно підключених модулів в один ряд до 32 одиниць включно із процесорним блоком. Ще одною важливою функцією 1516F-3 PN/DP є можливість комунікації за допомогою інтерфейсів PROFINET IO та PROFIBUS, що дозволяє поєднувати найрізноманітніші пристрої будь-яких інших виробників в комплексні механотронні системи, за умови що вони також підтримують відповідні комунікаційні інтерфейси.

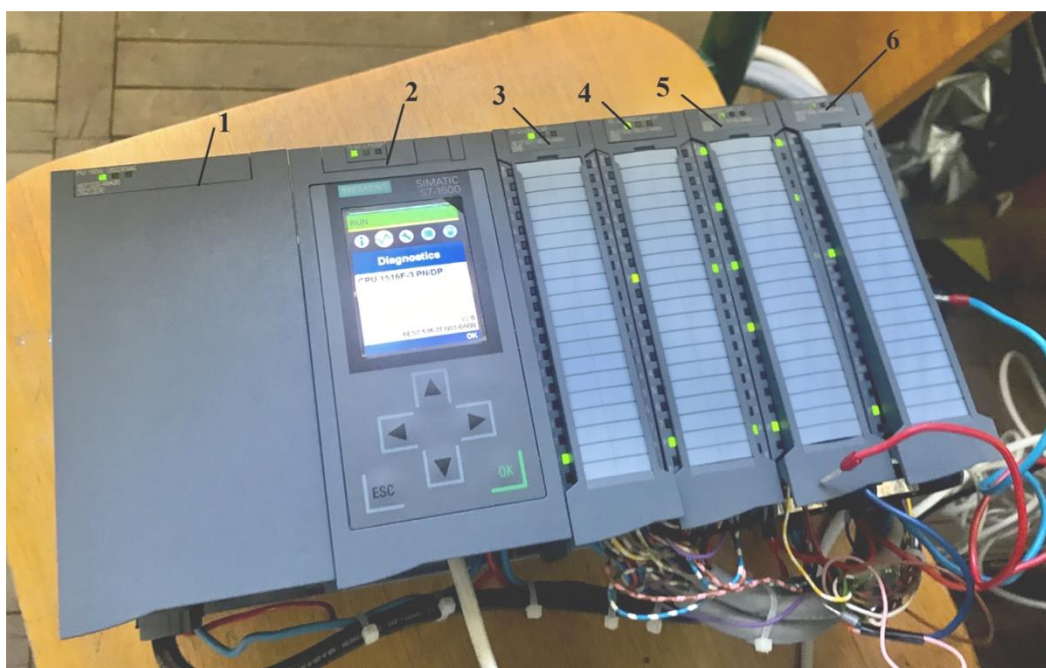


Рис.5.2. Комплектація використаного контролера

Ватметр

За необхідності визначення величини споживання електричної енергії в побутових , а також промислових цілях використовують лічильники електроенергії або ватметри.

Класичний ватметр має чотири контакти, двома з яких його вмикають в електричне коло послідовно з тією ділянкою кола, споживану потужність якої вимірюють, і двома паралельно до неї. Таким чином вимірюються два основних параметри: струм та напруга, з яких складається потужність:

$$P = I * U \quad (23)$$

Для визначення енергетичних витрат даної установки було використано ватметр ADIRO DC Wattmeter загальний вигляд якого показано на рис.5.3. технічні характеристики представлені у табл.5.0.



Рис.5.3.Ватметр – ADIRO DC Wattmeter

Таблиця 5.0

Технічні характеристики ADIRO DC Wattmeter

Напруга живлення	24В (+/-5%)
Діапазон вимірювань	0 – 60W/ 0 – 120W
Вихідний сигнал	Напруга: 0-10В Струм: 4-20мА
Комунікаційний інтерфейс	TCP/IP, V4

Так як насосна станція має найбільшу споживану потужність, а також виконує головну функцію в підтриманні рівня рідкої харчової продукції у витратному резервуарі в процесі дозування, підключаємо клеми двигуна насосної станції до ватметра по аналогії за схемою підключення електромагнітної запірної арматури (рис.5.5.).

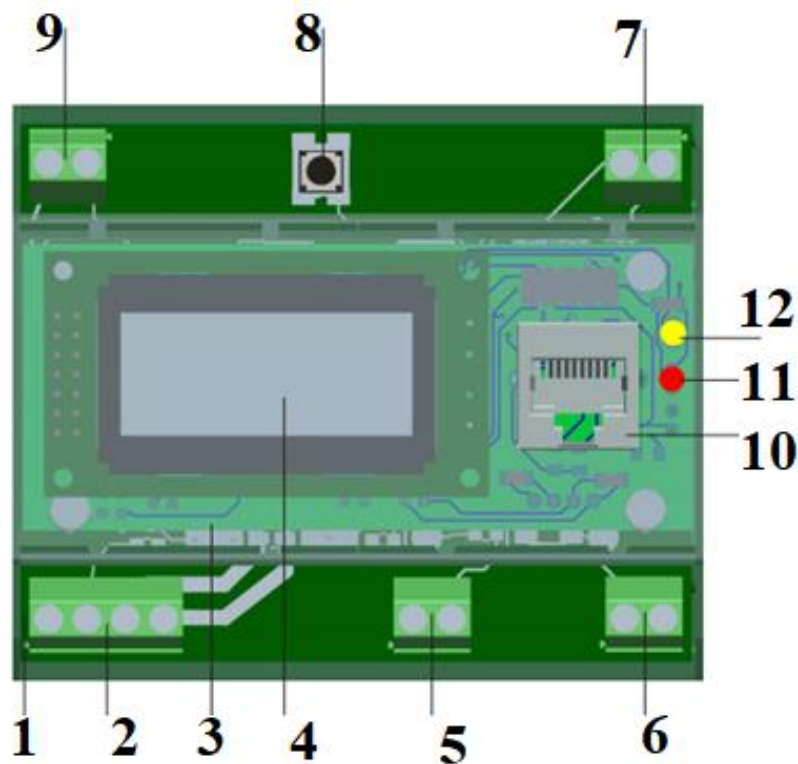


Рис.5.4. Конструкція ADIRO DC Wattmeter: 1 – головна група клем; 2 – клеми (V_{in} - вимірювання вхідної напруги споживача, (0 – 30 В); I_{in} - вимірювання вхідного струму споживача; Gnd – 0 В;); 3 – плата мікроконтролера дисплею і комунікаційного інтерфейсу для Ethernet-TCP; 4 – дисплей; 5 – клеми живлення 0 В; 6 – клеми живлення 24 В; 7 – клеми вихідного сигналу по струму (4-20мА); 8 – кнопка S1; 9 – клеми вихідного сигналу по напрузі (0-10В); 10 – роз’єм RJ45; 11 – DIP-перемикач;

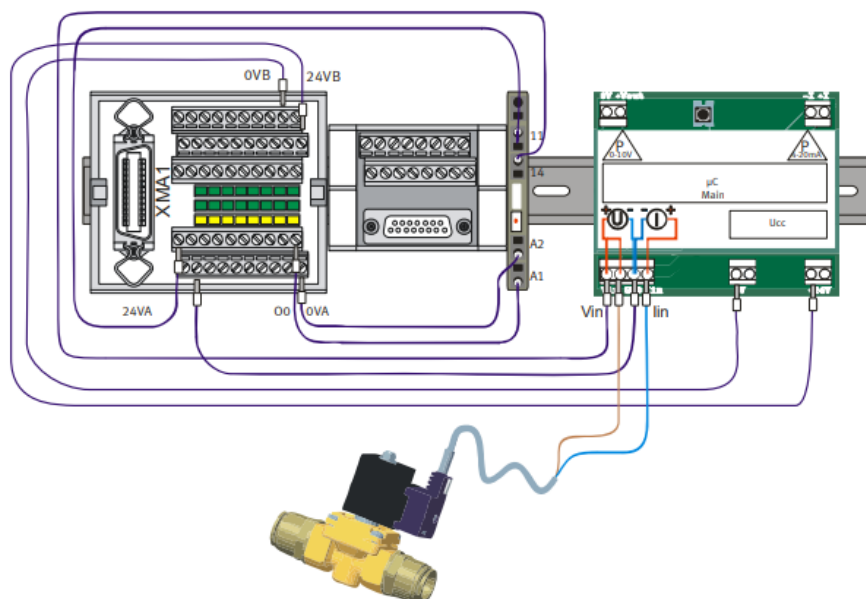


Рис.5.5. Принципова схема підключення споживача електроенергії (електромагнітної запірної арматури) до ватметра ADIRO DC Wattmeter;

Сенсорна панель людино-машинного інтерфейсу (HMI panel - KTP400 comfort)

Поява людино-машинного інтерфейсу на виробництві у вигляді сенсорних панелей багато в чому завдячує необхідності швидко переналагоджувати обладнання, ефективно та безпечно його експлуатувати. Панелі HMI – (Human Machine Interface), як правило застосовується з ПЛК і є своєрідним містком для взаємодії оператора, ПЛК та машини, даючи можливість першому не тільки ефективніше експлуатувати обладнання, а і проводити швидко діагностику та ідентифікацію несправностей. Перелічені переваги використання HMI панелей в масовому виробництві дозволяють зменшити прості обладнання та ліній в цілому.

Для проведення експериментальних досліджень нами було використано сенсорну панель **Siemens KTP400 comfort**, та спроектовану оригінальну модель тримача для кріплення панелі до головної стійки експериментальної установки **Festo EduKit PA Advanced**. Проектування 3D моделі відбувалось в середовищі **AutoDesk Inventor2017** (рис.5.6.), нарізання на шари в середовищі **Cura**, а друк здійснювався за допомогою 3D-принтера Ender-3 (рис.5.7.).

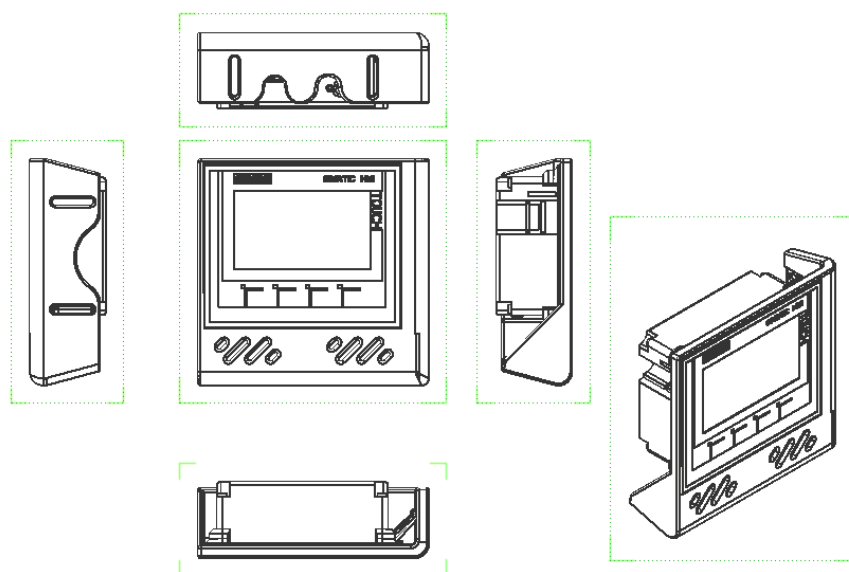


Рис.5.6. Проектування тримача для HMI-панелі в середовищі **AutoDesk Inventor2017**



Рис.5.7. 3D-принтер Ender-3

5.2. Налаштування та програмування мехатронної системи.

Важливим етапом введення будь-якої мехатронної системи в експлуатацію є її налагодження. В ході модернізації дослідної установки нами був розроблений план, важливою частиною якого є поступове додавання мехатронних модулів до системи, що дозволило мінімізувати кількість несправностей та помилок на кінцевих етапах програмування мехатронної системи, а також проведення експериментальних досліджень. Одночасно з цим здійснювалось:

- підключення мехатронних модулів;
- налаштування комунікації між пристроями;
- діагностика роботоздатності всієї системи;
- перевірка адекватності показів датчиків зворотнього зв'язку;
- написання та випробовування тестових керуючих програм;

Необхідно зауважити, що кожна із цих мір мала ітераційний характер, тому могла повторюватись декілька разів допоки не були отримані адекватні результати. Для кращого розуміння всієї структури мехатронної системи, її можна зобразити у вигляді спрощеної схеми (рис.5.8.).

Живлення мехатронної системи здійснюється мережею змінного струму 220В, до якої підключаються модульний блок живлення постійного струму 24В поз.1 для живлення НМІ-панелі поз.2, а також контролер S7-1500 поз.6 із вбудованим 190Вт блоком живлення.

В свою чергу за допомогою зовнішніх клем процесорний блок контролера та блоки входів/виходів послідовно підключають до блока живлення за аналогічною схемою (рис.5.9.). Таким чином до цифрових та аналогових блоків входів/виходів контролера можна підключати датчі зворотнього зв'язку та виконавчі органи, які в нашій системі підключені через розподілені модулі входів/виходів (рис.5.8. поз.4,5.) , що знаходяться на самій установці.

Підключення ПЛК поз.6, НМІ-панелі поз.2 та ПК поз.3 до мережі ProfiNet здійснювалось за допомогою промислового кабеля Ethernet із стандартним роз'ємом RJ45.

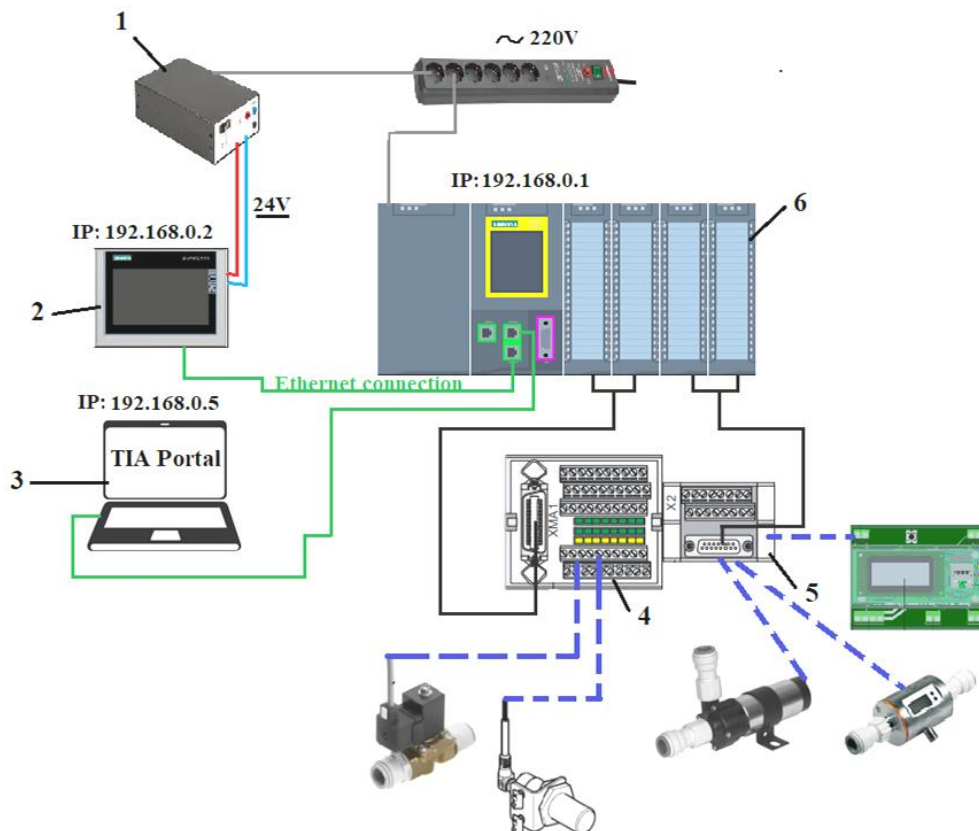


Рис.5.8. Структурна схема мехатронної системи: 1 – блок живлення 24В; 2 - НМІ-панель; 3 – ПК; 4 – блок дискретних входів/виходів; 5 – блок аналогових входів/виходів; 6 – ПЛК;

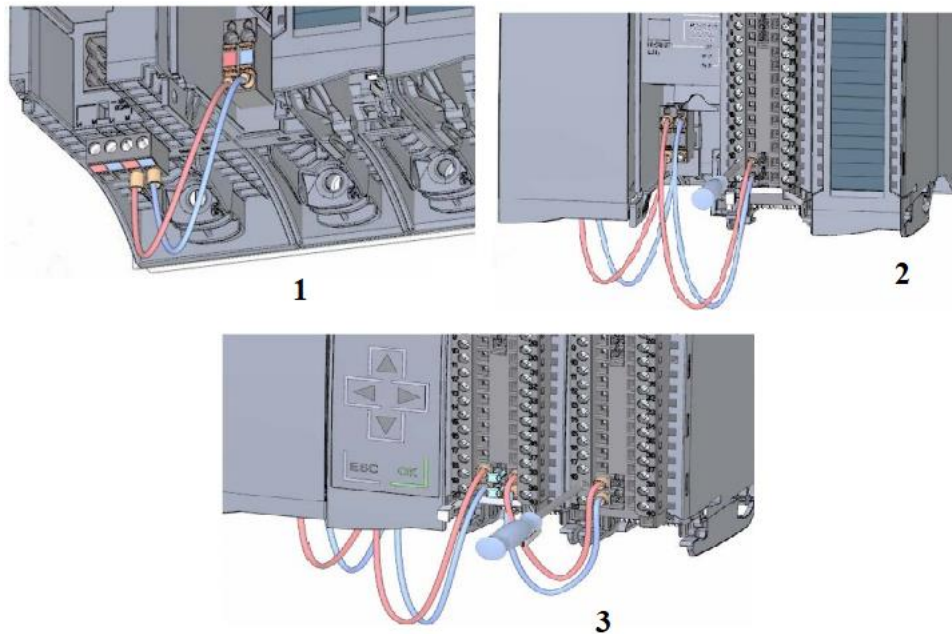


Рис.5.9. Схема підключення модулів ПЛК до блока живлення: 1 – підключення клем блока живлення до центрального процесорного блоку; 2,3 – послідовне підключення живлення до блоків входів-виходів;

5.2.1. Налаштування комунікації між пристроями

Перед тим, як проектувати будь-яку мехатронну систему важливо розуміти не тільки фізико-механічні, технологічні особливості проектованої машини, а і те, яким чином така система матиме змогу обмінюватись інформацією з іншими пристроями. З метою обміну даними в промисловості будуються мережі на основі стандартних протоколів комунікації:

- HART Protocol;
- EtherCat;
- ControlNet;
- ProfiBus;
- ProfiNet;
- DeviceNet;
- MPI – Multi Point Interface;
- та ін.;

Відповідно до технічної документації пристроїв CPU 1516F-3 PN/DP та KTP400 comfort спільними інтерфейсами є Industrial Ethernet та RS485. Так, як немає особливих вимог до подальшої побудови мережі обираємо інтерфейс Industrial Ethernet, на основі якого будуюмо **Process Field Network** – мережу польового рівня (ProfiNet).

Конфігурація та налаштування адресації здійснюється в середовищі TIA Portal у вкладинці *Devices&Networks*, Рис.5.10., попередньо виконавши апаратну конфігурацію пристроїв за допомогою вкладниці *Device configuration*.

Після успішного налаштування зв'язку між пристроями, у вкладниці *Connections* налаштувань KTP400 comfort має з'явитися доступний вузол комунікації, який є унікальним для кожного пристрою.

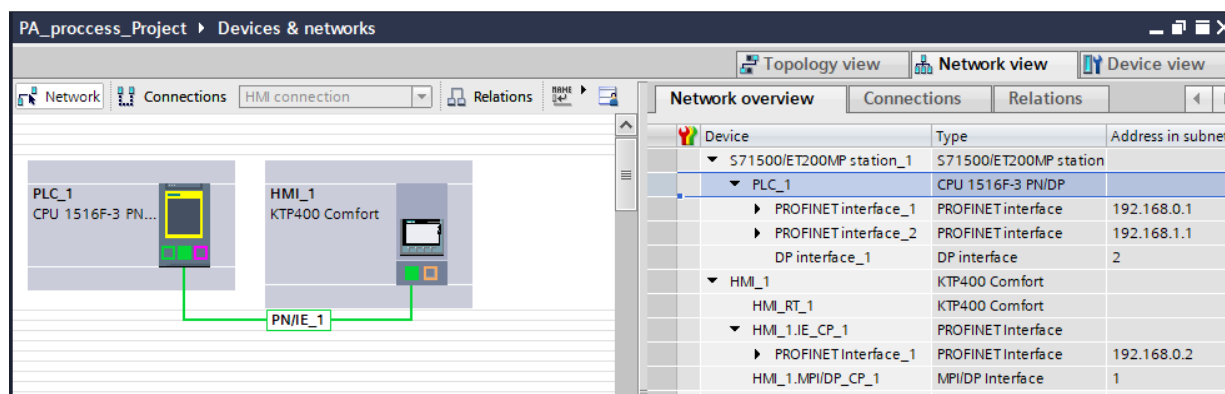


Рис.5.10. Налаштування мережі

Налаштувавши зв'язок між НМІ-панеллю та контролером S7-1500, наступним важливим етапом є створення глобального блоку даних в який будуть записуватися виключно змінні(теги) зв'язані з керуючими елементами користувацьких екранів НМІ-панелі (кнопки, повзунки, поля вводу/виводу та ін..) . Кожний такий елемент зв'язаний із конкретним НМІ-тегом , що з'єднаний з глобальними змінними котрі далі будуть використовуватись для побудови інструкцій.

Name	Data type	Start value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint	Supervis...	Comment
1	Static		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
2	Operation_states		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
3	On_st	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
4	Error_st	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
5	Buttons		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
6	On_bt	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
7	Off_bt	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
8	Res_bt	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
9	E_bt	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
10	valve_swich	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
11	screens_val		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
12	screen_number	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
13	back_but	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
14	activate_mode_bt	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		

Рис.5.11. Створення глобального блоку для обміну даними з НМІ-панеллю

Після завантаження конфігурації та необхідних блоків пристрої готові для обміну даними.

Name	Tag table	Data type	Connection	PLC name	PLC tag	Addr...
Activate_mode	HMI tags PID mode	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	HMI_DB.screens_val.a...	
back_button	Default tag table	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	HMI_DB.screens_val.back...	
consumption_watts	HMI tags Experiments mode	Real	HMI_Connection_1	PLC_1	Process_val.WattMeter_...	
E_button	HMI tags Manual mode	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	HMI_DB.Buttons.E_bt	
EM_valve	Default tag table	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	EM_valve	
Error	HMI tags Manual mode	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	HMI_DB.Operation_state...	
flow	HMI tags Manual mode	Real	HMI_Connection_1	PLC_1	Process_val.Flow(l/min)	
lev_setpoint	HMI tags PID mode	Real	HMI_Connection_1	PLC_1	Process_val.PID_set_poin	
level	HMI tags Manual mode	Real	HMI_Connection_1	PLC_1	Process_val.LevelTank(l)	
motorVoltage	HMI tags Manual mode	Real	HMI_Connection_1	PLC_1	Process_val.motorVolt(r...	
n_doses	HMI tags Experiments mode	Int	HMI_Connection_1	PLC_1	Process_val.dosating_va...	
Off_button	HMI tags Manual mode	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	HMI_DB.Buttons.Off_bt	
ON_button	HMI tags Manual mode	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	HMI_DB.Buttons.On_bt	
On_state	HMI tags Manual mode	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	HMI_DB.Operation_state...	
PID_Compact_1_Retain_CtrlParams_Gain	Default tag table	Real	HMI_Connection_1	PLC_1	PID_Compact_1.Retain.Ct...	
PID_Compact_1_Retain_CtrlParams_Td	Default tag table	Real	HMI_Connection_1	PLC_1	PID_Compact_1.Retain.Ct...	
PID_Compact_1_Retain_CtrlParams_TdFiltRatio	Default tag table	Real	HMI_Connection_1	PLC_1	PID_Compact_1.Retain.Ct...	

Рис.5.12. Зв'язок тегів НМІ панелі та глобального блоку даних

5.2.2 Програмування ПЛК

Написання керуючих програм в середовищі TIA Portal здійснюється за допомогою програмних блоків до яких відносяться:

- Організаційні блоки, OB (Organization blocks);
- Функціональні блоки, FB (Function blocks);
- Функції, FC (Functions);
- Блоки даних, DB (Data blocks);

Принципова структура комплексної програмної одиниці, яка відображає взаємозв'язки програмних блоків показана на рис.5.13..

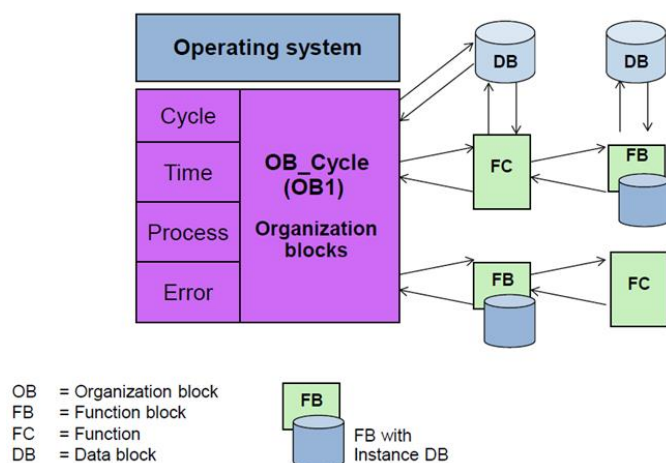


Рис.5.13. Принципова структура програми в середовищі TIA Portal

Як можна побачити центральним елементом будь-якої програми є організаційний блок OB1 (рис.5.13.), який циклічно виконується операційною системою. Керуюча програма програма може зберігатися в OB1, що циклічно буде викликатись операційною системою (лінійна програма), або може бути розділена, і збережена в декілька блоків (структурована програма).

Організаційні блоки в свою чергу мають ієрархію або краще сказати пріоритетність виконання в процесі роботи циклічної програми – це необхідно для виконання спеціальних завдань. Класифікація організаційних блоків відповідно до їх функцій подана на рис.5.14..

В середовищі програмування підтримуються мови програмування стандарту **IEC 61131-3** (LAD, FBD, SFC, STL, IL), що є досить зручною можливістю, так як кожна із цих мов має свої переваги при вирішенні певних задач. Написана нами кінцева програма включає в себе програмні блоки написані на мовах: LAD, FBD, SFC (GRAPH) та SCL. Із структурою проекту можна ознайомитися у вигляді «дерева» рис.5.15., де розміщені всі програмні блоки, а також реалізований людино-машинний інтерфейс за допомогою користувацьких екранів в середовищі **WinCC**.

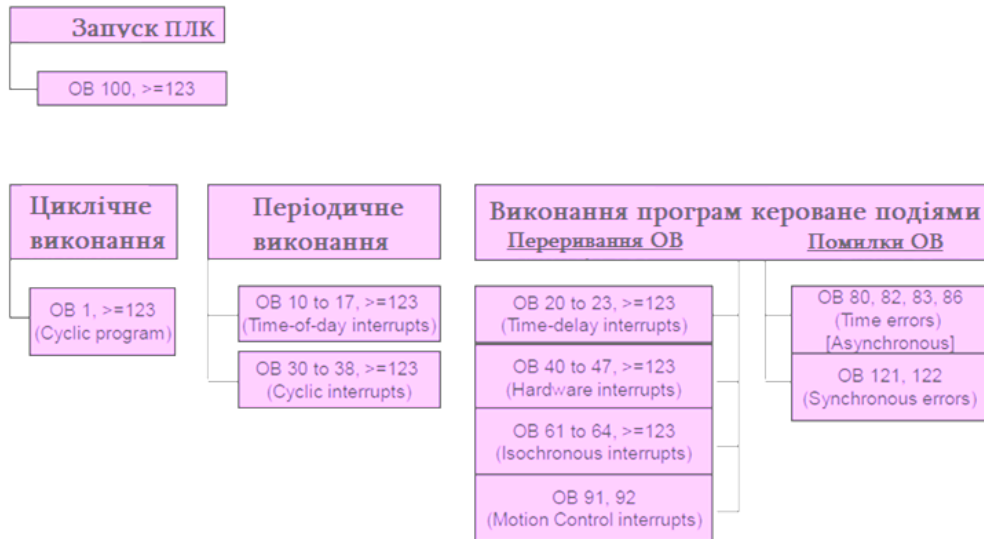


Рис.5.14. Класифікація організаційних блоків в середовищі програмування TIA Portal

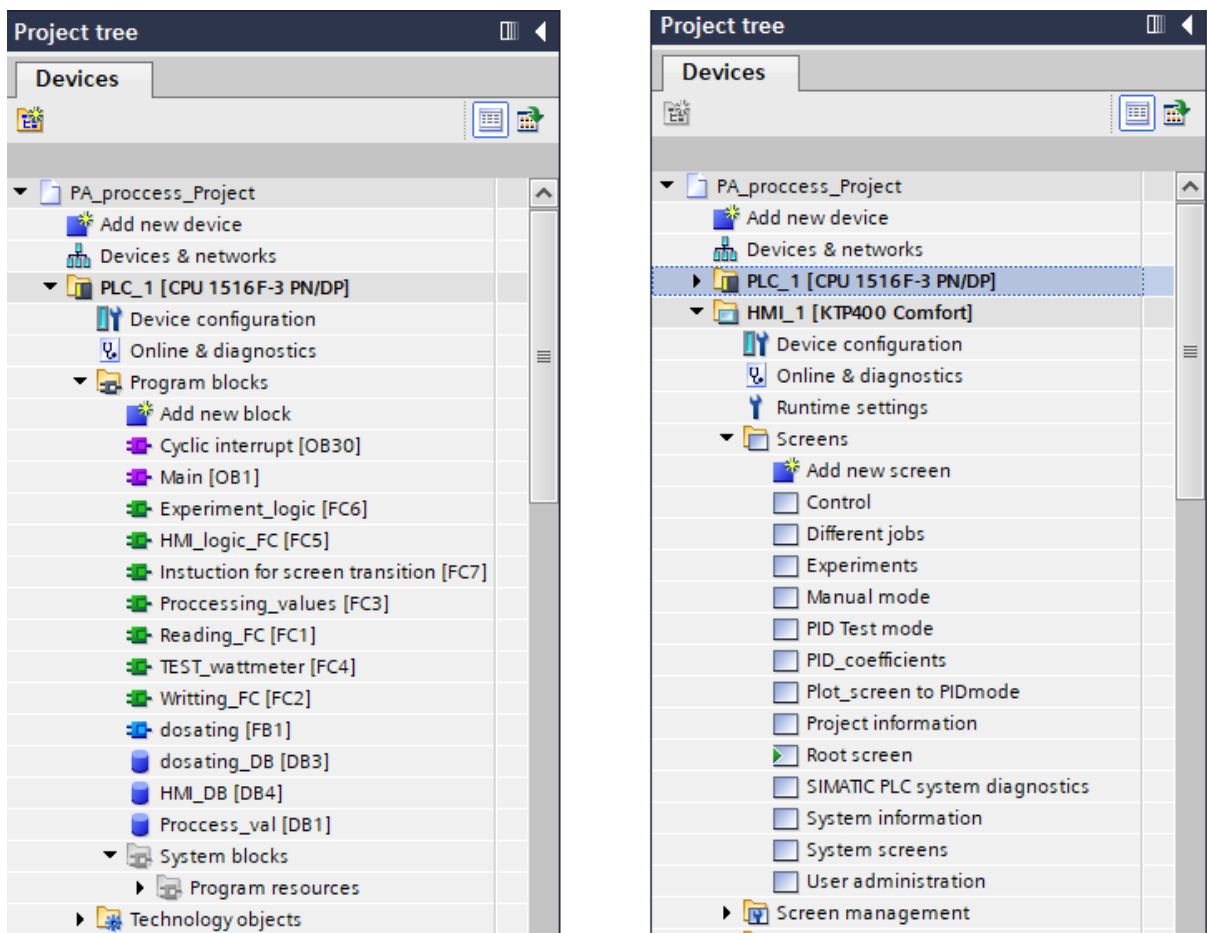


Рис.5.15. Дерево проекту

5.3 Експериментальні дослідження

Мета: Дослідження коливань рівня рідини у витратному резервуарі та енергетичних витрат пов'язаними із роботою насосної станції на підтримання рівня у витратному резервуарі в процесі дозування рідкої харчової продукції за умови зміни величини місцевого опору гідравлічної системи.

Зміна величини місцевого опору в гідравлічній системі здійснювалась за рахунок зміни кута повороту ручки запірної арматури *JohnGuest 15ESOT*, кути: 0°, 10°, 20°, 30°.

Опис проведення експерименту:

імітація процесу дозування складається із наступних етапів:

1. Задавання параметрів процесу дозування за допомогою панелі людино-машинного інтерфейсу;
2. Ввімкнення двигуна, та набирання рідини у витратний резервуар до заданого рівня;
3. По досягненню рівня, запірна арматура у вигляді електромагнітного клапану реалізує необхідну кількість доз згідно із заданим циклом дозування;
4. Завершення процесу дозування, вимкнення двигуна та вивільнення рідини із витратного резервуару;

Параметри процесу дозування:

- Рідина : вода питна ($\rho = 997 \text{ кг/м}^3, t = 22^\circ\text{C}$);
- Рівень рідкої харчової продукції у витратному резервуарі – 1л.;
- Кількість доз – 10;
- Час фасування продукції в тару – 3с.;
- Затримка між фасуванням : – 3с.;

Для підтримання рівня у витратному резервуарі на програмному рівні використали PID - регулятор параметри якого визначені автоматично в процесі само налаштування (рис.5.16.).

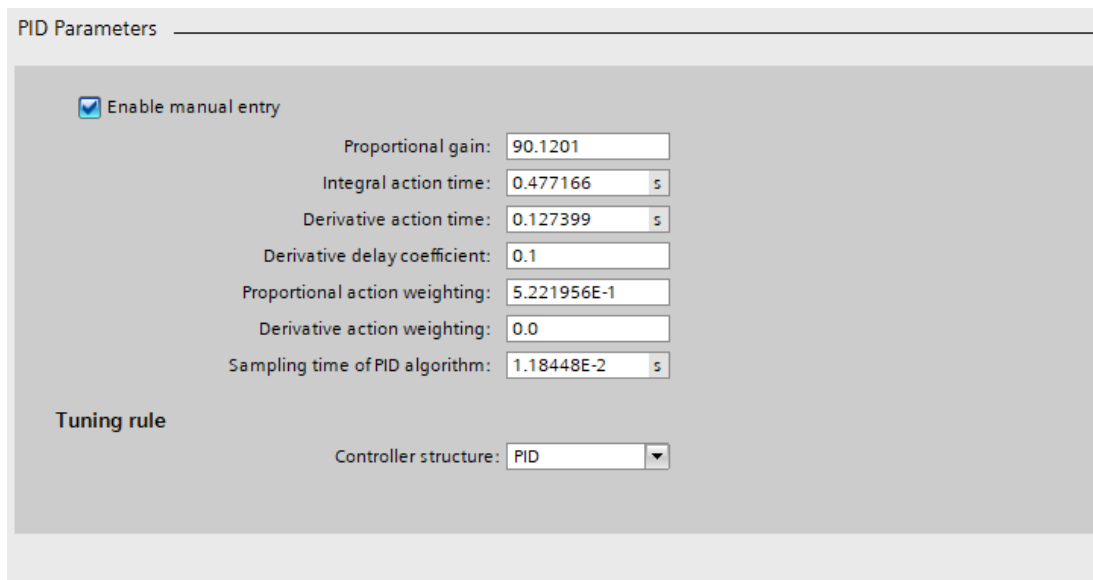


Рис.5.16. Коефіцієнти ПД-регулятора

Одночасно із фіксуванням даних про енергетичні витрати, для кожного експерименту у режимі реального часу фіксувались покази датчика рівня у витратному резервуарі, а також значення споживаної та сумарної потужності, в результаті чого отримали графіки зміни рівня та споживаної потужності за часом в процесі дозування (рис.5.17, рис.5.18.)

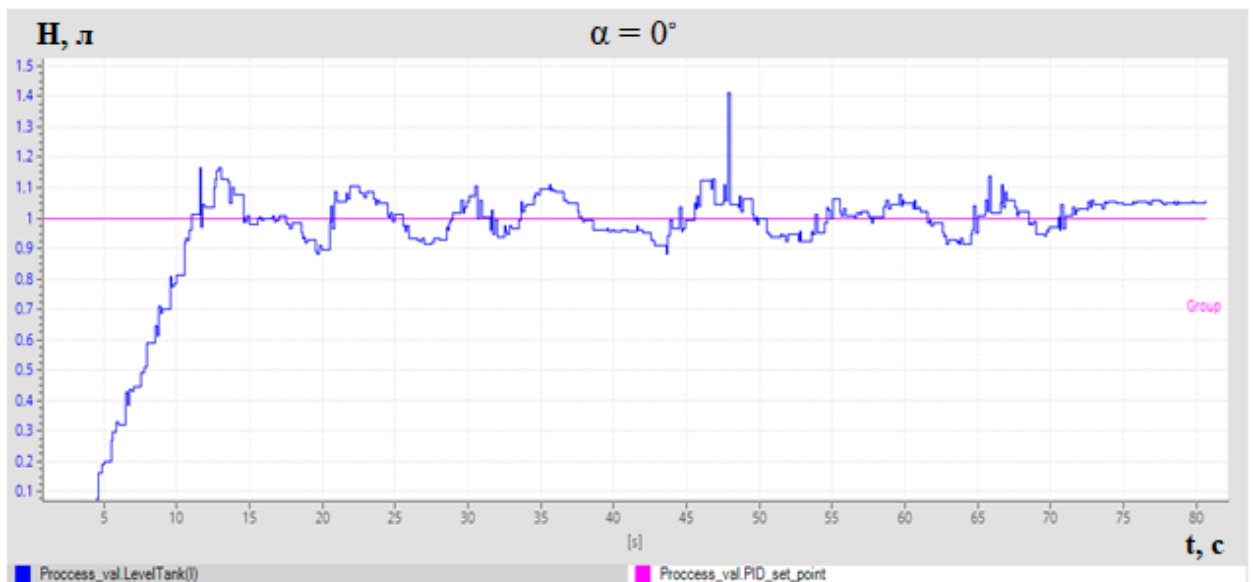


Рис.5.17. Коливання рівня рідини у витратному резервуарі в процесі дозування ($\alpha = 0^\circ$)

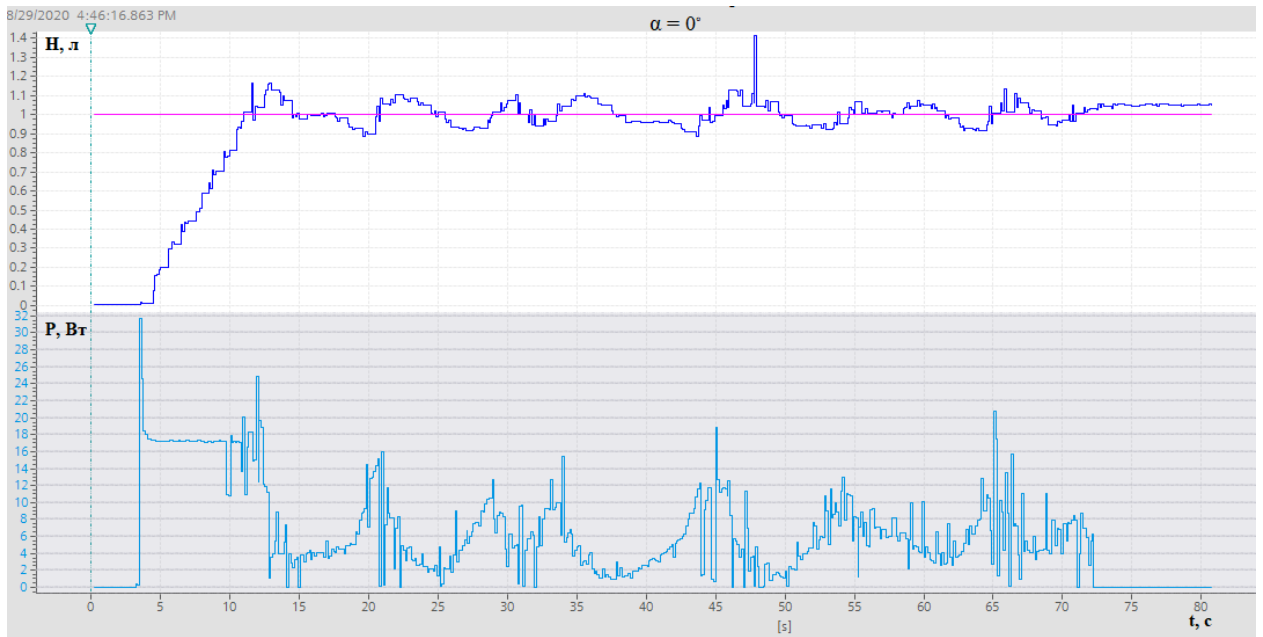


Рис.5.18. Суміщений графік коливань рівня у витратному резервуарі та споживаної потужності ($\alpha = 0^\circ$)

Проводимо аналогічні дослідження для $\alpha = 10^\circ$; 20° ; 30° та подаємо у вигляді графіків (рис.5.19., рис.5.20., рис.5.21.)

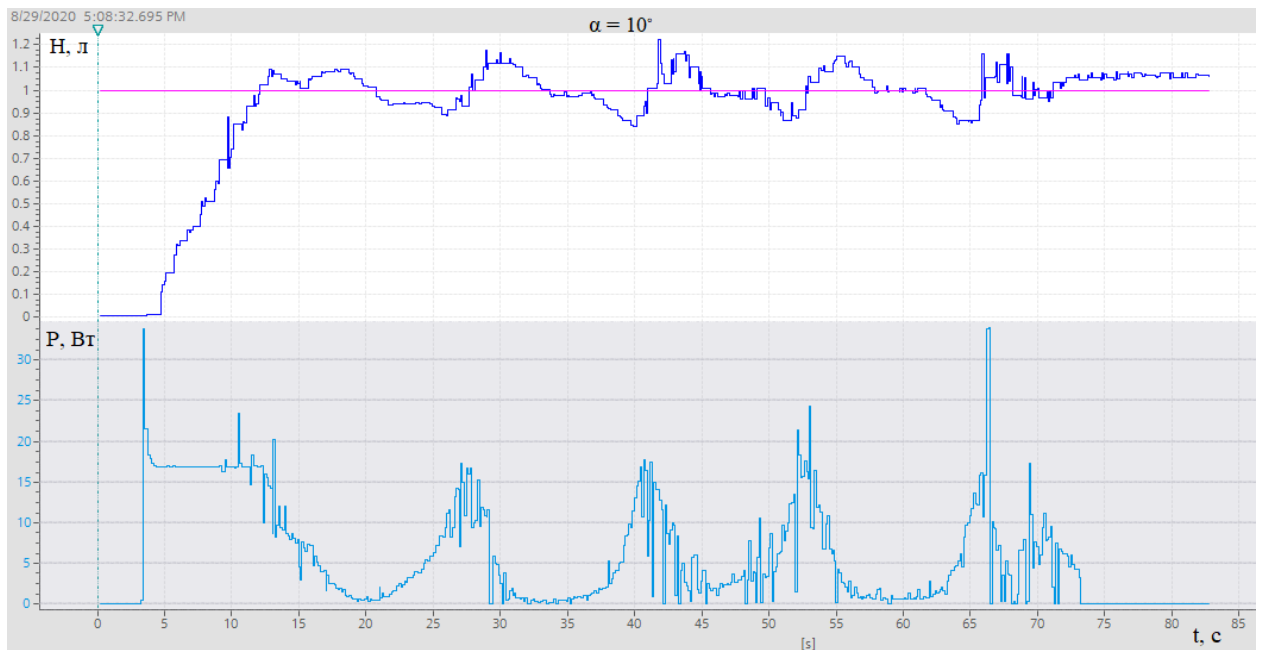


Рис.5.19 Суміщений графік коливань рівня у витратному резервуарі та споживаної потужності ($\alpha = 10^\circ$)

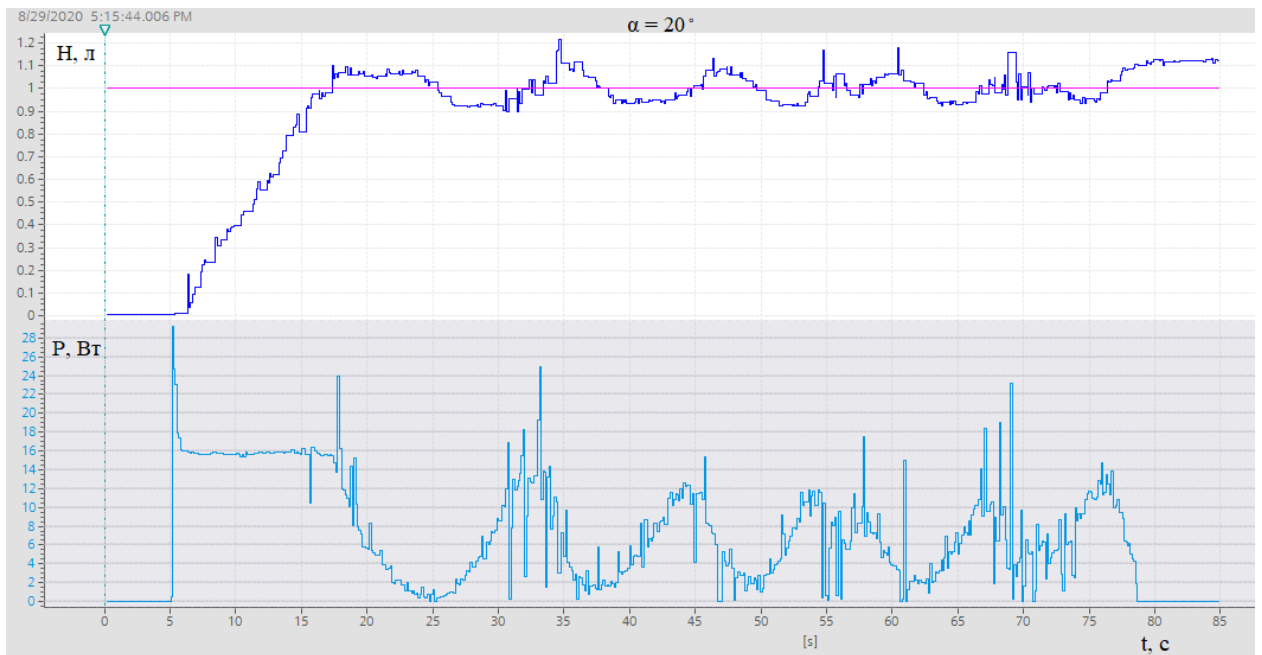


Рис.5.20 Суміщений графік коливань рівня у витратному резервуарі та споживаної потужності ($\alpha = 20^\circ$)

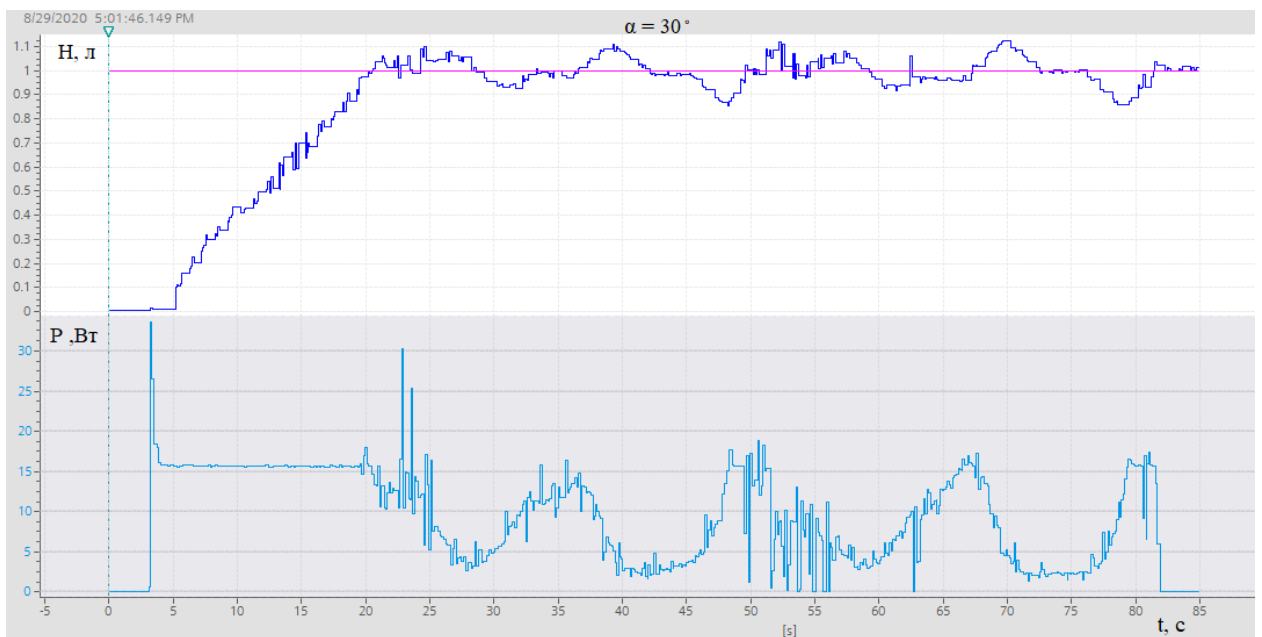


Рис.5.21 Суміщений графік коливань рівня у витратному резервуарі та споживаної потужності ($\alpha = 30^\circ$)

Для зручності аналізу отриманих результатів сумістимо графіки коливань рівня та споживаної потужності з часом для всієї групи досліджень (рис.5.22., рис.5.23.).

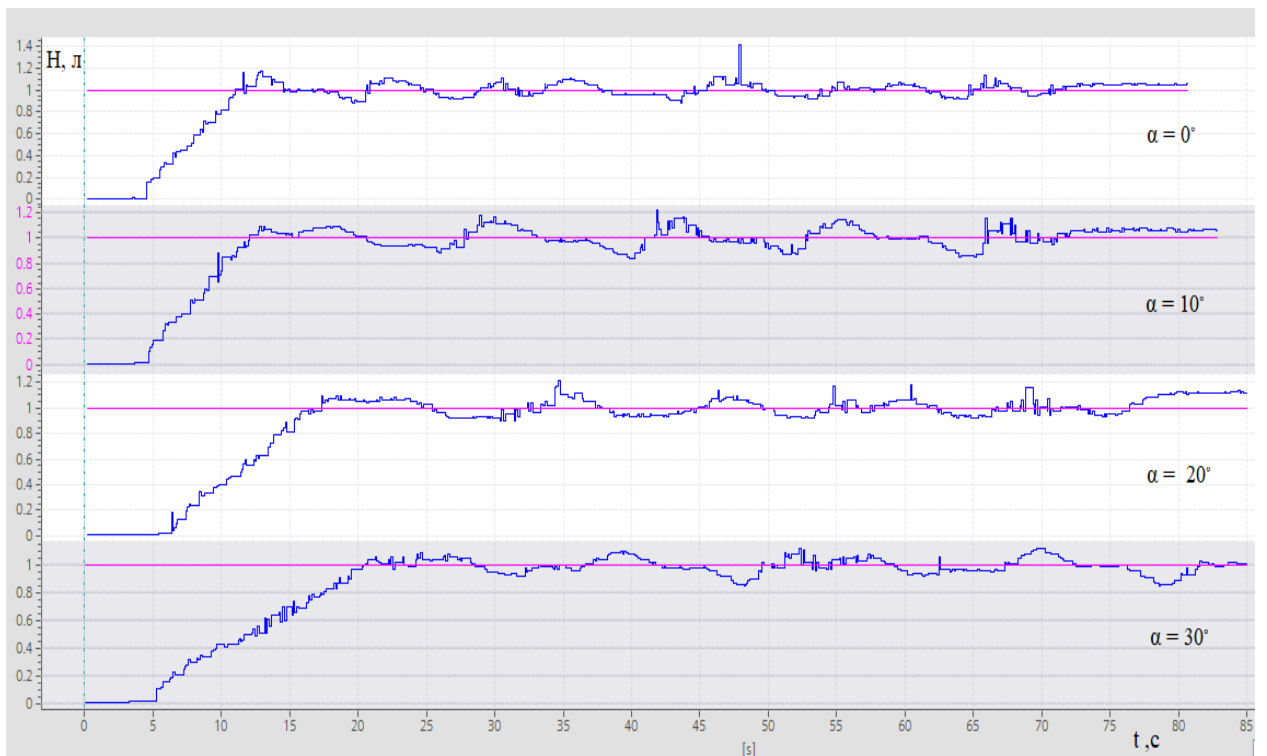


Рис.5.22. Суміщений графік коливань рівня у витратному резервуарі в процесі дозування рідини.

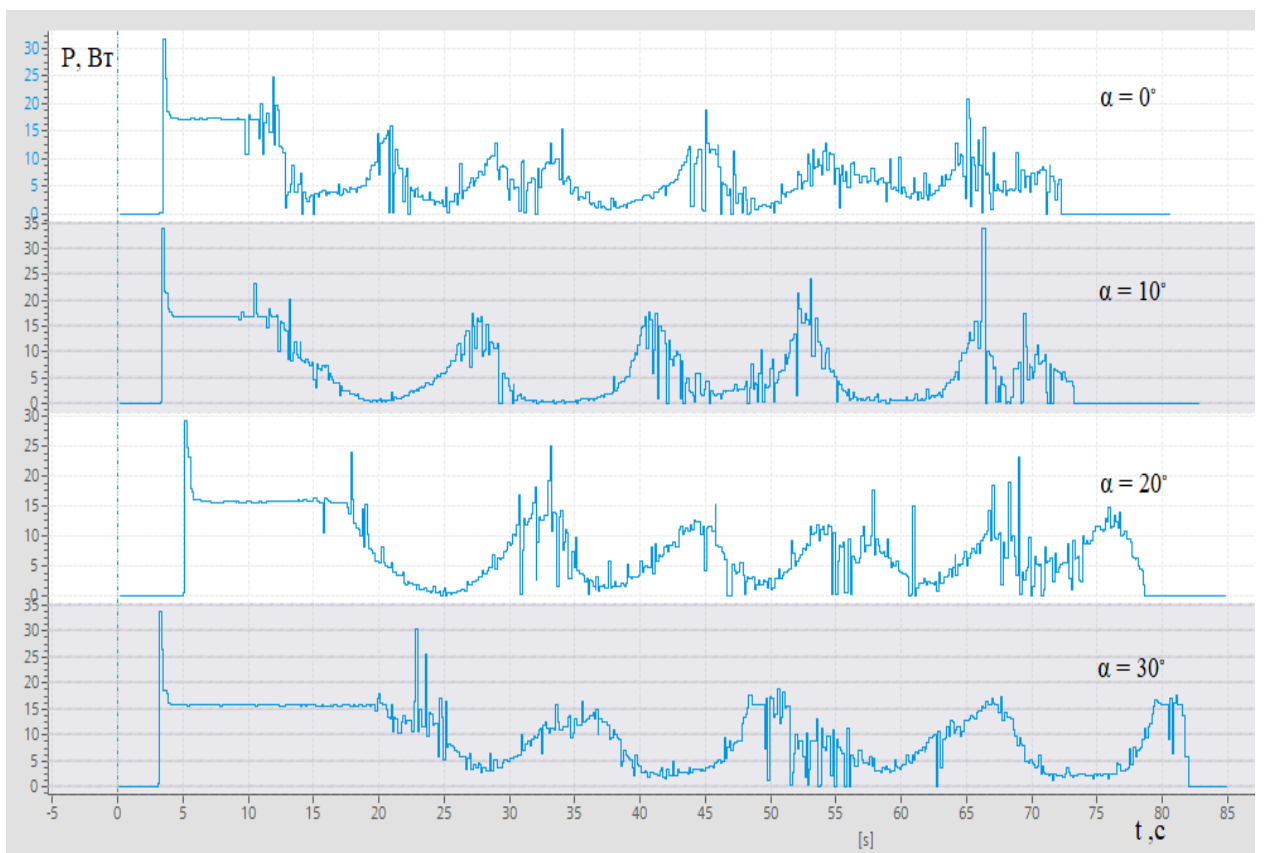


Рис.5.23. Суміщений графік коливань споживаної потужності в процесі дозування рідини.

Висновки до розділу №5

Отримавши суміщені графіки коливань рівня рідини у витратному резервуарі та споживаної потужності при різних кутах повороту запірної арматури (рис.5.17-5.23) можна зробити наступні висновки:

1. На етапі набирання рідини до заданого рівня у резервуар, кут повороту запірної арматури змінює величину приросту рівня рідини у резервуарі за одиницю часу, себто змінюється швидкість набирання рідини у верхній витратний резервуар. Про що можуть свідчити збільшення відрізка t_n – час набирання рідини, а також кут між умовною лінією, що максимально суміщена з відрізком графіку рівня на етапі набиранні рідини у витратний резервуар, та віссю абсцис (рис.5.24.).

Як бачимо із графіків, при повністю відкритій запірній арматурі, гідравлічній мехатронній системі потрібно $t_{n1}= 8с.$, для заповнення витратного резервуару до рівня в $H = 1л.$ та початку дозування.

При закритті запірної арматури, час необхідний системі для набирання рідини до заданого рівня збільшується до $t_{n4}=18с.$.

При цьому необхідно зауважити, що загальний час процесу дозування вираховується за формулою :

$$\sum t = t_n + n * (t_\phi + t_b) \quad (5.1)$$

, де t_n – час набирання рідини у витратний резервуар до заданого рівня;

t_ϕ – час фасування; t_b – час вистою; n – кількість доз;

t_ϕ , t_b , n – постійні параметрами досліджуваного процесу, що задаються програмно, тоді час дозування без урахування параметру t_n складає :

$$t' = n * (t_\phi + t_b) = 10(3 + 3) = 60с.$$

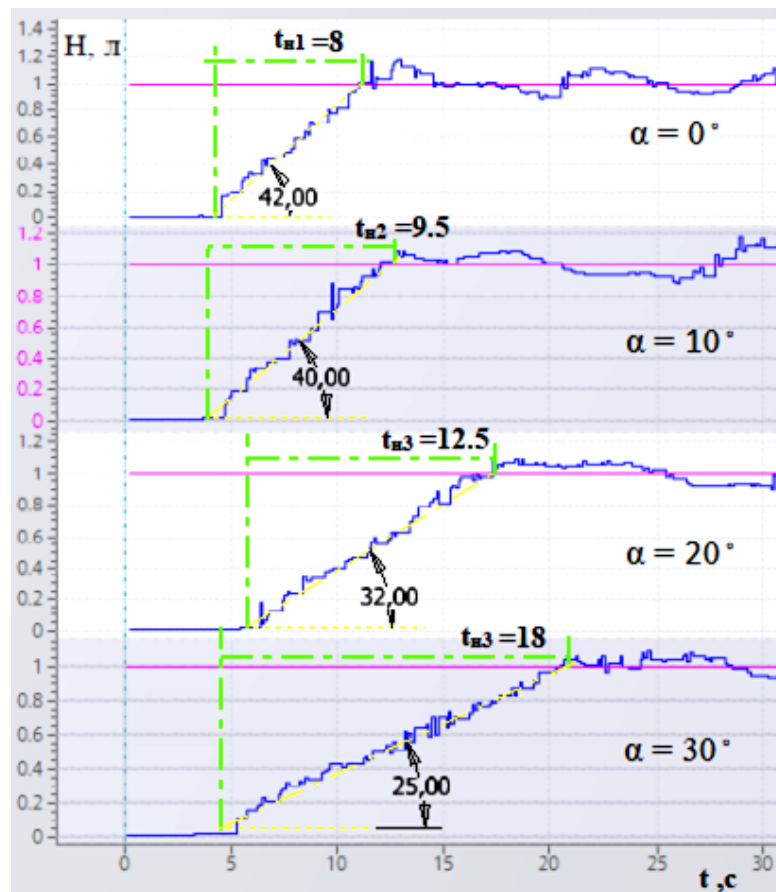


Рис.5.24. Вплив кута повороту запірної арматури α на час набирання рідини в резервуар t_n

2. Провівши аналіз графіків за допомогою *TIA Portal*, а саме вбудованих інструментів *Measurements* та *Combined Measurements*, було досліджено величину відхилення поточного рівня рідини ΔH в процесі дозування від заданого (табл.5.1.), бачимо, що коливання рівня знаходяться в межах $\Delta H = 0,25 - 0,32$ л.. Зауважимо, що збільшення місцевого опору в гідравлічній системі не дає однозначного впливу на коливання рівня. Тому на даному етапі досліджень вважаємо, що зміна величини місцевого опору не в значній мірі впливає на коливання рівня в процесі дозування.
3. Аналіз сумарних енергетичних витрат $\sum P$ насосної станції в процесі дозування рідкої харчової продукції (табл..5.1) показує, що збільшення внутрішнього опору в гідравлічній системі призводить до збільшення сумарних енергетичних витрат, що очевидно є наслідком збільшення

часу набирання t_n рідини у витратний резервуар. На суміщених графіках коливання рівня рідини у витратному резервуарі та споживаної потужності (рис.5.18-5.23) бачимо, що саме на етапі набирання рідини у витратний резервуар двигун найдовший проміжок часу споживає максимальну потужність.

Таблиця 5.1.

Результати експериментальних досліджень

	ΔH , л	ΣP , Вт*год	Σt , с	t_n , с
$\alpha = 0^\circ$	0.25	0.122	69	8
$\alpha = 10^\circ$	0.32	0.137	70	9.5
$\alpha = 20^\circ$	0.29	0.166	74	12.5
$\alpha = 30^\circ$	0.27	0.206	79	18

ΔH , [л] – коливання рівня рідини у витратному резервуарі;

ΣP , [Вт*год] – сумарні енергетичні витрати насосної станції в процесі дозування;

Σt , с – тривалість процесу дозування;

t_n , [с] – тривалість набирання рідини у витратний резервуар до заданого рівня;

Загальні висновки до роботи:

1. Результати експериментальних досліджень напірної характеристики трубопровідної мережі гідравлічної мехатронної системи (Рис.3.9. – 3.12.) показали, що теоретичне рівняння записане відповідно до характеристичного (1) репрезентативно описує вибірку результатів отриманих дослідним шляхом. В певному наближенні така залежність може бути використана для подальших аналітичних досліджень даної гідравлічної системи.
2. Теоретичні рівняння отримані в результаті експериментальних досліджень робочої характеристики насосної станції (Рис.3.13. – 3.14.) мають аналогічно репрезентативний характер, для подальшого використання в аналітичних дослідження отримані залежності потребують додаткових досліджень.
3. Визначене в результаті проведення багатofакторного експерименту математично-статистичне рівняння витрат рідини в системі може бути використане для написання програм керування, де в широкому діапазоні необхідно керувати обертами двигуна та контролювати технологічні параметри даної мехатронної системи.
4. Експериментальне дослідження коливання рівня рідини у витратному резервуарі в процесі дозування рідкої харчової продукції показало, що стандартний програмний блок **TIA Portal** PID-регулятора успішно виконує технологічне завдання по підтриманню рівня рідини у витратному резервуарі навіть при зміні величини місцевого опору гідравлічної системи (Табл.5.1.).

Список використаної літератури:

1. Пашков.Є.В., Осинський Ю.О. : Промислові механотронні системи на основі пневмоприводу, 2007р.
2. Гавва О.М., Беспалько А.П., Волчко А.І., Кохан О.О.: Пакувальне обладнання, 2010р.
3. Соколенко А.І., Українець А.І., Яровий В.Л., Васильківський К.В. та ін.: Справочник механіка пищевой промышленности, 2004р.
4. Угинчус А.А.: Гидравлика и гидравлические машины, 1966р.
5. П.А. Люкшин А.С. Демидов А.Н. Площаднов: Гидравлика и основы гидропривода, 2009р.
6. М.В.Якимчук, О.М.Гавва, А.П.Беспалько, Л.О.Кривопляс-Володіна, С.В.Токарчук: Проектування пакувального обладнання із мехатронних модулів.
7. Farhan A. Salem, Ahmad A. Mahfouz : Mechatronics Subsystems' Classification, Role, Selection Criteria and Synergistic Integration in Overall System Design, American Journal of Educational Science , October 19, 2016
8. Frank Lamb: Industrial Automation Hands-On ,2013
9. Гіргідов А.Д. Механіка рідини і газу (гідравліка). / СПб .: Изд-во СПбДПУ, 2003. - 544 с.
10. Грачов Ю.П., Плаксін Ю.М. Математичні методи планування експерименту. / М. ДеЛіпрінт, 2005. - 296 с.
11. Іващенко А. Т. Прилади й засоби автоматизації ./М .: Научтехлітгиздат, 2004.
12. Калачов М.В. Дизайн машин і апаратів харчових виробництв. / М., ДеЛіпрінт, 2001. - 140 с.
13. Кавецький Г.Д., Васильєв Б.В. Процеси і апарати харчової технології. / М., Колос, 1999. - 551 с.

14. Машинобудування. Енциклопедія. Т. IV - 17. Машини та обладнання харчової та переробної промисловості. / Фролов К.В., ред., Мачихіна С.А., ред., М., «Машинобудування», 2003. - 736 с.
15. Машини та обладнання для дозування рідких продуктів. / Ташкент, УзНІНТІ, 1990. - 4 с.
16. Панфілов В.А., Ураков О.А. Технологічні лінії харчових виробництв. / М., Харчова промисловість, 1996. - 472 с.
17. Петров В.І. Основи розрахунку і конструювання машин і апаратів харчових виробництв. / Кемерово, КемГТУ, ч. 1,2, 2002 р.- 127 с.
18. Современное фасовочно - укупорочное оборудование для пищевой промышленности./М., ЦНИИТЭИпищепром, 1991 .-16 с.
19. Статистические методы обработки эмпирических данных. М., Издательство стандартов, 1978. — 232 с.
20. Технологія і техніка харчових виробництв. / Зб. КемТІПП, 2004. – 239с.
21. Шамшурко СМ. Створення сучасних дозаторів. / Праці V Науково - практичної конференції «Сучасні проблеми в харчовій промисловості», вип. 4, М., МГЗІПП, 1999.
22. Computational Techniques for Fluid Dynamics//Fletcher, C.A., Ed.; N.Y., 1990.- 502 p.
23. Основи наукових досліджень у прикладних задачах / Л. О.Кривопляс-Володіна, О. М. Гавва, В. Л. Яровий, С. В. Токарчук. – Київ: Сталь, 2016. – 271 с.
24. SIEMENS SIMATIC S7-1500, ET 200MP, ET 200SP, ET 200AL, ET 200pro Communication Function Manual
25. SIMATIC S7-1500 CPU 1516-3 PN/DP (6ES7516-3AN01-0AB0) Manual
26. SIMATIC S7-1500/ET 200MP Load power supply module PM 190 W 120/230 VAC (6EP1333-4BA00) Manual
27. SIMATIC Wiring Getting Started Manual
28. SM6000 SMR12GGXFRKG/US-100 Manual
29. Festo EduKit-PA Station Brief Description

30. Festo FluidLab-PA process software Manual
31. SIEMENS SIMATIC HMI KTP400 Comfort 6AV2124-2DC01-0AX0 Manual
32. Festo DC-Wattmeter 573261 Manual
33. Агрегатно-модульне технологічне обладнання: у 3-х част.: навч. посіб. для ВНЗ / Під заг. ред. Ю.М. Кузнєцова. – Частина 1. Принципи побудови агрегатно-модульного технологічного обладнання. – Кіровоград, 2003. – 422 с.
34. Вода, напитки, продукты питания / А. И. Соколенко, А. И. Украинец, В. Л. Яровой, В. А. Поддубный ; под ред. А. И. Соколенко. — К. : П.П.Люксар, 2006. — 368 с.
35. Енергоматеріальні потоки харчових і мікробіологічних виробництв: монографія / А.І. Соколенко, В.А. Піддубний, К.В. Васильківський та ін. ; за ред. д-ра техн. наук, проф. Соколенка А.І. – К. : Кондор-Видавництво, 2016. – 326 с.
36. Лукинов А.П. Проектирование мехатронных и робототехнических устройств: учебн./ А.П.Лукинов – М.: Лань, 2012 -308с.
37. Мехатроніка: конспект лекцій для студ. спец. 7.05050206 «Машини і технологія пакування» та 7.05050207 «Машини і ресурсозберігаючі технології переробки упаковки» денної форми навч. / Л. О. Кривопляс-Володіна, М. В. Якимчук. – К. : НУХТ, 2015. – 114 с.
38. Пальчевский Б.О. Автоматизация технологических процессов (выготовления и пакування виробів): навч. посіб. / Пальчевский Б.О. – Львів: Світ, 2007. – 392 с.