

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) ІНІТІ ім. акад. І.С. Гулого  
Кафедра мехатроніки та пакувальної техніки

«До захисту в ЕК»

Директор інституту(декан факультету)

(підпис)

Сергій БЛАЖЕНКО.  
(прізвище та ініціали)

« 10 » грудня 2025р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Людмила КРИВОПЛЯС-ВОЛОДИНА  
(підпис) (прізвище та ініціали)

« 10 » грудня 2025р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

зі спеціальності 131 Прикладна механіка  
(код та назва спеціальності)  
освітньо-професійної програми Прикладна механіка

на тему: «Дослідження мехатронної системи приводу вузла видуву обладнання для формування ПЕТ-пляшок»

Виконав: здобувач 2 курсу, групи 3

Володін Михайло Сергійович  
(прізвище, ім'я, по батькові повністю)

(підпис)

Керівник Токарчук Сергій Володимирович  
(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

(підпис)

Консультанти \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

(підпис)

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

(підпис)

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент Александр Р.А.  
(прізвище та ініціали)

(підпис)

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

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2025 р.

Інститут (факультет)

Кафедри

Освітній ступінь

Спеціальність

Освітньо-професійна програма

ННІТІ ім. акад. І.С. Гулого

мехатроніки та пакувальної техніки

магістр

131 Прикладна механіка

(код і назва)

Прикладна механіка

(назва)

## ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МПТ

Людмила КРИВОПЛЯС-ВОЛОДИНА

“15” листопада 2025 року

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Володіна Михайла Сергійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження мехатронної системи приводу вузла видуву обладнання для формування ПЕТ-пляшок»

керівник роботи Токарчук Сергій Володимирович, к.т.н, доц,

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від “15” 10 2025 року № 845-КК

2. Строк подання здобувачем роботи 05.12.2025р

3. Вихідні дані до роботи технологічний процес — формування ПЕТ-пляшок методом видуву з прес-форми; продуктивність обладнання — 60 пляшок/хв; робоче середовище приводу — стиснене повітря; номінальний робочий тиск у системі видуву — до 4,0 МПа; запірно-регулювальна арматура в зоні підведення повітря до вузла видуву — DN15, PN16, різьбове приєднання, з аналоговим сигналом керування; тип приводу вузла видуву — пневматичний мехатронний модуль із керованими клапанами високого тиску; режим роботи — циклічний, з повторюваними перехідними процесами під час подачі та скидання тиску.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Реферат українською. Реферат англійською. Вступ. Розділ 1. Розділ 2. Розділ 3. Розділ 4. Висновок. Список використаної літератури.

5. Перелік графічного матеріалу

слайди презентації



## **ЗМІСТ**

РЕФЕРАТ .....	2
ВСТУП.....	4
ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ .....	6
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЙ ВУЗЛІВ ВИДУВУ ТА ОПИС ВЛАСНОЇ ПРОПОЗИЦІЇ.....	7
1.1. Технологічні особливості процесу видуву ПЕТ пляшок.....	8
1.2. Особливості систем керування мехатронною системою приводу вузла видуву обладнання для формування ПЕТ-пляшок .....	10
1.3. Практичні аспекти процесу видуву ПЕТ-пляшок .....	15
1.4. Загальні технічні рішення конструювання модулів видуву .....	18
1.5. Обґрунтування власної пропозиції .....	24
Висновки до розділу 1 .....	25
РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНКОВО-АНАЛІТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ .....	26
2.1. Визначення основних параметрів і конструктивних елементів .....	26
2.2. Обґрунтування конструкції клапанної системи та розрахунок параметрів пневмоприводу вузла видуву .....	29
2.3. Розрахунок масових витрат повітря в докритичному режимі витікання стисненого повітря .....	30
2.4. Розрахунок приводу механізму з'єднання форм роздувної установки .....	36
Висновки до розділу 2 .....	39
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ КЛАПАНА ВИСОКОГО ТИСКУ В МЕРЕЖІ ВИДУВУ.....	41
3.1. Опис дослідної установки .....	41

3.2. Опис об'єкта дослідження.....	42
3.3. Результати експериментальних досліджень.....	44
Висновки до розділу 3 .....	52
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ .....	54
4.1. Вимоги з охорони праці та безпечної експлуатації обладнання ПЕТ-видуву.....	54
4.1.1. Підготовка персоналу до роботи .....	54
4.1.2. Підготовка робочої зони.....	54
4.1.3. Огляд обладнання перед початком роботи.....	55
4.2. Стан інвентарю та допоміжних засобів .....	56
4.3. Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях при роботі з гідравлічним або пневматичним тиском.....	56
ВИСНОВОК.....	59
ДОДАТОК А.....	65
ДОДАТОК Б.....	66

## РЕФЕРАТ

### Дослідження мехатронної системи приводу вузла видуву обладнання для формування ПЕТ-пляшок

Мехатронні системи приводу вузлів видуву є ключовими елементами сучасного обладнання для формування ПЕТ-пляшок і визначають стабільність процесу видуву, точність геометрії виробів та якість готової тари. Вони характеризуються високою швидкістю, компактністю, можливістю інтеграції з автоматизованими системами керування та використанням стисненого повітря як енергоносія, однак наявність перехідних процесів, інерційність пневматичних елементів і змінні навантаження ускладнюють забезпечення стабільних режимів роботи вузла видуву.

Дослідження мехатронних систем приводу вузла видуву з метою підвищення точності стабілізації тиску, зменшення перехідних коливань і зниження енергетичних втрат є *актуальним* науково-прикладним завданням. На підставі аналізу літературних джерел і технічних рішень у галузі пневматичних приводів обладнання для формування ПЕТ-тари об'єктом дослідження обрано пневматичний привід вузла видуву з керованими клапанами високого тиску та системою аналогового керування.

Метою магістерської роботи є дослідження динамічних і статичних характеристик мехатронної системи приводу вузла видуву та підвищення ефективності керування процесом формування ПЕТ-пляшок шляхом оптимізації режимів подачі й стабілізації стисненого повітря. У роботі виконано математичне моделювання процесів зміни тиску в пневматичному модулі, досліджено вплив параметрів запірно-регулювальної арматури та алгоритмів керування на перехідні процеси під час циклів видуву. Експериментальна частина базується на використанні спеціалізованого стенда з пневматичним приводом і засобами вимірювання тиску, що дало змогу отримати часові залежності параметрів процесу та виконати їх статистичну обробку.

**Ключові слова:** ПЕТ-пляшки, вузол видуву, мехатронна система, пневматичний привід, стабілізація тиску, запірно-регулювальна арматура, перехідні процеси.

## **ABSTRACT**

### **Research of the mechatronic drive system of the blow moulding unit of equipment for forming PET bottles**

Mechatronic drive systems of blow moulding units are key elements of modern equipment for forming PET bottles and determine the stability of the blow moulding process, the accuracy of product geometry and the quality of the finished container. They are characterised by high speed, compactness, the possibility of integration with automated control systems and the use of compressed air as an energy source. However, the presence of transient processes, the inertia of pneumatic elements and variable loads complicate the provision of stable operating modes for the blow moulding unit.

Research into mechatronic drive systems for blow moulding units with the aim of improving pressure stabilisation accuracy, reducing transient oscillations and lowering energy losses is a relevant scientific and practical task. Based on an analysis of literature sources and technical solutions in the field of pneumatic drives for PET container forming equipment, the object of the study is a pneumatic drive of the blow moulding unit with controlled high-pressure valves and an analogue control system.

The aim of the master's thesis is to study the dynamic and static characteristics of the mechatronic system of the blow moulding unit drive and to improve the efficiency of the PET bottle forming process by optimising the compressed air supply and stabilisation modes. The thesis includes mathematical modelling of pressure change processes in the pneumatic module and investigates the influence of shut-off and control valve parameters and control algorithms on transient processes during blow moulding cycles. The experimental part is based on the use of a specialised stand with a pneumatic drive and pressure measuring devices, which made it possible to obtain time dependencies of process parameters and perform their statistical processing.

**Keywords:** PET bottles, blow moulding unit, mechatronic system, pneumatic drive, pressure stabilisation, shut-off and control valves, transient processes.

## ВСТУП

У сучасній пакувальній індустрії технології формування ПЕТ-пляшок методом роздуву займають провідне місце завдяки високій продуктивності, універсальності та можливості отримання тари з наперед заданими геометричними й міцнісними характеристиками. Центральним елементом цього процесу є вузол видуву, робота якого безпосередньо визначає якість готової пляшки, рівномірність розподілу матеріалу по стінках, стабільність геометрії та відсоток браку. Саме тому мехатронна система приводу вузла видуву розглядається як критично важливий компонент сучасного обладнання для формування ПЕТ-тари [1,5].

Сучасні технології ПЕТ-видуву активно розвиваються в напрямі підвищення швидкодії та енергоефективності, зменшення маси пляшки (light-weighting), використання вторинного ПЕТ (rPET), а також інтеграції інтелектуальних систем керування. У промислових установках дедалі ширше застосовуються пневматичні мехатронні модулі з електропневматичними клапанами високого тиску, пропорційними регуляторами, аналоговими та цифровими каналами керування, а також системи моніторингу параметрів процесу в реальному часі. Використання швидкодіючих клапанів, багатоступеневого профілю подачі повітря та адаптивних алгоритмів керування дозволяє формувати складні часові закони зміни тиску, необхідні для оптимального роздуву преформи.

Разом із тим процес видуву ПЕТ-пляшок характеризується значною складністю. Він відбувається в умовах високих тисків, швидкоплинних перехідних процесів і змінних тепломеханічних властивостей матеріалу преформи. Динаміка подачі та скидання стисненого повітря супроводжується коливаннями тиску, інерційними явищами в трубопроводах і клапанних елементах, а також затримками, пов'язаними з пружністю повітря та об'ємами робочих камер. Навіть незначні відхилення режимів тиску або часу спрацювання

клапанів можуть призводити до нерівномірного розтягу матеріалу, локального тоншення стінок, деформацій або зростання відсотка браку.

Особливої актуальності проблема стабілізації та керування процесом видуву набуває в умовах високопродуктивних ліній, де цикли формування повторюються з високою частотою, а система працює в режимі багаторазових перехідних процесів. У таких умовах традиційні схеми керування з фіксованими налаштуваннями часто виявляються недостатньо ефективними, оскільки не враховують змінні параметри процесу, зношування елементів пневматичного приводу та вплив зовнішніх збурень [7].

У зв'язку з цим дослідження мехатронної системи приводу вузла видуву обладнання для формування ПЕТ-пляшок є актуальним науково-технічним завданням. Воно спрямоване на глибоке розуміння динамічних процесів у пневматичних приводах, визначення ключових факторів, що впливають на стабільність тиску та якість видуву, а також на розроблення обґрунтованих рекомендацій щодо підвищення ефективності й надійності роботи обладнання. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення алгоритмів керування, зменшення енергоспоживання, підвищення ресурсу пневматичних компонентів і загального підвищення конкурентоспроможності технологій виробництва ПЕТ-тари.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

*Об'єкт дослідження.* Мехатронна система приводу вузла видуву обладнання для формування ПЕТ-пляшок, що включає пневматичні виконавчі елементи, запірно-регулювальну арматуру високого тиску та систему керування процесом подачі й стабілізації стисненого повітря.

*Методи дослідження.* Аналітичні та статистично-математичні методи, методи теорії пневматичних і газодинамічних систем, математичне моделювання динамічних процесів у пневмоприводах, імітаційне моделювання з використанням прикладних програмних пакетів MATLAB/Simulink, а також експериментальні методи дослідження перехідних процесів тиску.

*Матеріали дослідження.* Пневматичні приводи вузлів видуву, керовані клапани високого тиску, елементи пневматичних магістралей, стиснене повітря як робоче середовище, а також експериментальні дані щодо режимів подачі та скидання тиску в процесі формування ПЕТ-пляшок.

*Наукова новизна.* Проведено дослідження динаміки мехатронної системи приводу вузла видуву з урахуванням перехідних процесів подачі та стабілізації тиску, що дозволило виявити закономірності впливу параметрів пневматичних елементів і алгоритмів керування на стабільність процесу видуву та якість формування ПЕТ-пляшок.

*Практична цінність.* Отримані результати експериментальних і теоретичних досліджень узагальнено та подано в графічному вигляді, що дає змогу використовувати їх для аналізу й оптимізації режимів роботи вузла видуву. Запропоновані підходи можуть бути застосовані при проектуванні та налаштуванні пневматичних мехатронних систем видуву з метою підвищення стабільності, енергоефективності та надійності обладнання для формування ПЕТ-тари.

## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЙ ВУЗЛІВ ВИДУВУ ТА ОПИС ВЛАСНОЇ ПРОПОЗИЦІЇ

У більшості випадків тиск і температура стисненого повітря, а також термомеханічні властивості ПЕТ-преформи є визначальними величинами, що формують перебіг процесу видуву. Параметри повітряного середовища залежать від рівня робочого тиску, температури, швидкості подачі, об'єму ресиверів і динамічних характеристик пневматичних елементів, тоді як властивості преформи визначаються ступенем нагріву, в'язко-пружним станом полімеру та товщиною стінок заготовки. Саме узгодження цих факторів забезпечує стабільність процесу формування ПЕТ-пляшок і відтворюваність їх геометричних параметрів.

Процес видуву може здійснюватися за різними технологічними схемами: з одноступеневою або багатоступеневою подачею повітря, з попереднім роздувом (pre-blow) і основним високотисковим видувом, а також із керованим профілем зміни тиску в часі. Попередній етап подачі повітря використовується для рівномірного розтягування нагрітої преформи та зменшення локальних напружень у матеріалі, що дозволяє підвищити якість пляшки та знизити ймовірність дефектів. Основний етап видуву здійснюється за високого тиску і визначає остаточну форму виробу[1,15].

До критичних факторів процесу належать також інерційність пневматичної системи, втрати тиску в трубопроводах, швидкодія та пропускна здатність клапанів високого тиску. За своїми динамічними характеристиками пневматичний привід вузла видуву не забезпечує миттєвого встановлення заданого тиску, що призводить до перехідних коливань і нерівномірного навантаження на матеріал преформи. Тому під час формування ПЕТ-пляшок необхідно реалізовувати керовану подачу й скидання тиску з урахуванням часових затримок і динаміки пневматичного модуля [4,9,17].

ПЕТ-преформа як вихідна заготовка характеризується певними фізико-механічними властивостями, зокрема температурною залежністю модуля пружності, здатністю до орієнтованого розтягування, теплопровідністю та залишковими напруженнями після інфрачервоного нагріву. Нерівномірність температурного поля або нестабільність режимів подачі повітря можуть призводити до локального тоншення стінок, деформацій горловини або зниження міцності готової тари [11,13].

Таким чином, процес формування ПЕТ-пляшок методом видуву є складним багатофакторним процесом, у якому вирішальну роль відіграє узгоджена робота мехатронної системи приводу вузла видуву, параметрів стисненого повітря та властивостей полімерного матеріалу. Це обумовлює необхідність детального дослідження динаміки пневматичного приводу, розроблення обґрунтованих моделей керування та оптимізації режимів роботи обладнання для забезпечення стабільної якості ПЕТ-тари

### **1.1. Технологічні особливості процесу видуву ПЕТ пляшок**

Технологічний процес формування ПЕТ-пляшок реалізується за двоступеневою схемою розтягувально-видувного формування і включає послідовність механічних, теплових та пневматичних операцій, тісно інтегрованих у єдину мехатронну систему [17,25]. Узагальнену схему процесу подано на рис. 1.1.

На початковому етапі (позиція 1, рис. 1.1) преформи завантажуються навалом у накопичувальний бункер. Далі здійснюється первинне орієнтування преформ у вібробункері з подачею їх в елеватор (позиція 2, рис. 1.1), що забезпечує поштучне транспортування заготовок у визначеному просторовому положенні. Вторинне орієнтування (позиція 3, рис. 1.1) призначене для остаточного вирівнювання преформ перед зоною термічної обробки та усунення можливих збоїв орієнтації.

Наступним ключовим етапом є розігрів преформ у печі інфрачервоного випромінювання (позиція 4, рис. 1.1). У цій зоні преформи нагріваються до

температурного діапазону, за якого поліетилентерефталат переходить у високоеластичний стан. Керування процесом розігріву здійснюється шляхом багатозонного регулювання потужності галогенних ламп та швидкості транспортування преформ, що дозволяє сформувати заданий температурний профіль по довжині заготовки з локальним перегрівом донньої частини та термічною стабілізацією горловини.

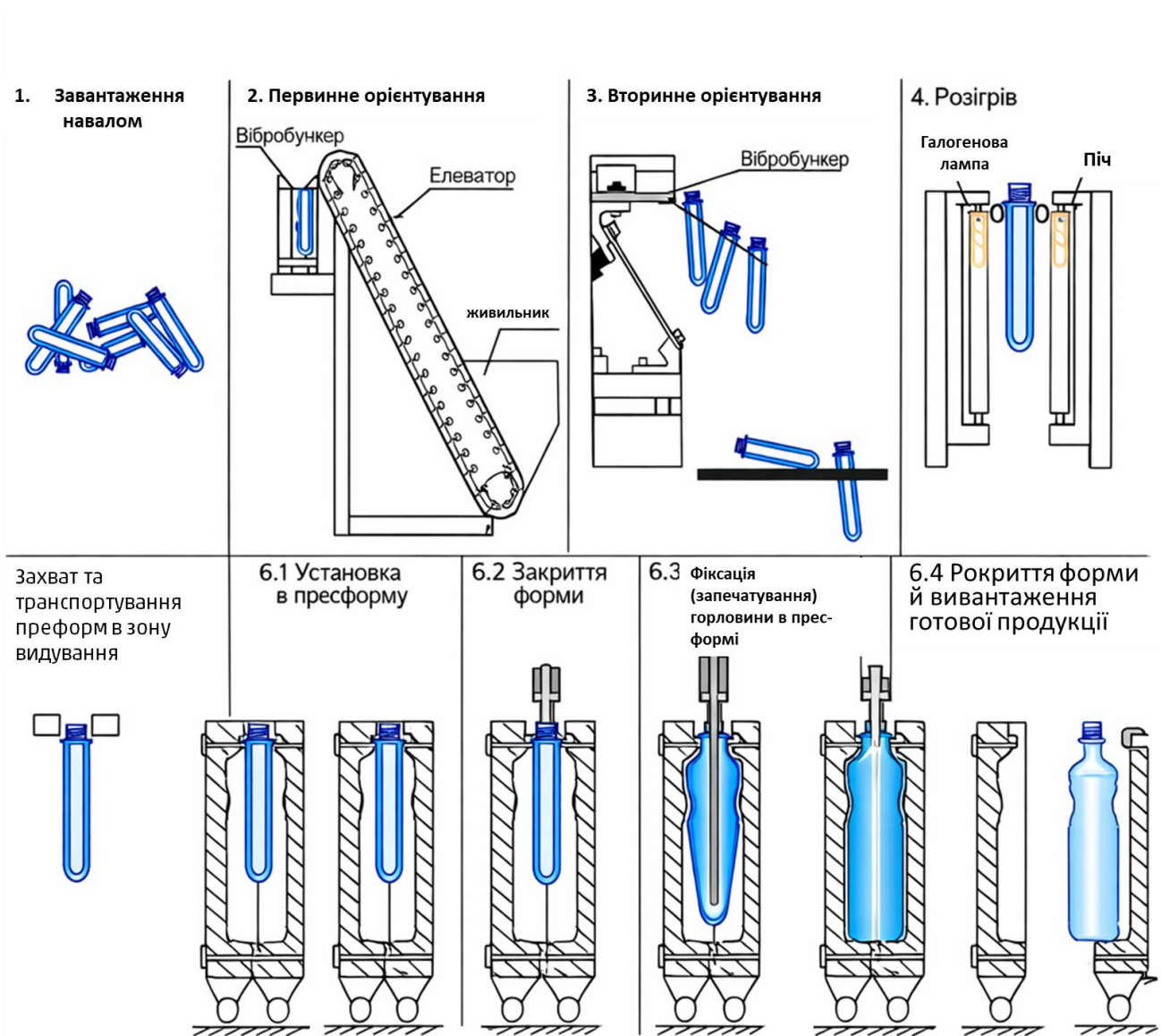


Рис.1.1. Технологічний процес формування ПЕТ-пляшок

Після виходу з печі преформи захоплюються транспортним механізмом і подаються в зону видуву (позиція 5, рис. 1.1). На цьому етапі здійснюється установка преформи в порожнину прес-форми (позиція 6.1, рис. 1.1) з фіксацією

за горлову частину. Далі відбувається закриття прес-форми (позиція 6.2, рис. 1.1), що створює герметичний об'єм, необхідний для формування внутрішнього тиску.

Фіксація (запечатування) горловини преформи в прес-формі (позиція 6.3, рис. 1.1) забезпечує герметичність з'єднання між преформою та системою подачі стисненого повітря. Саме з цього моменту починається безпосередня робота мехатронної системи приводу вузла видуву, яка координує рух штока розтяжки та пневматичні процеси. На стадії розтяжки штоком із передвидувом, здійснюється поздовжнє витягування розігрітої преформи за допомогою штока, керованого пневматичним або сервоприводом. Одночасно в порожнину подається повітря зниженого тиску (передвидув), що ініціює радіальне розширення заготовки. Узгодження швидкості руху штока з параметрами передвидуву є визначальним для формування рівномірної біаксіальної орієнтації матеріалу.

Основний видув здійснюється шляхом подачі повітря високого тиску, під дією якого заготовка щільно притискається до стінок прес-форми та набуває остаточної геометрії пляшки. Стабільність цього етапу визначається не лише величиною тиску, а й динамікою його наростання, яка залежить від швидкодії клапанів, характеристик пневмоприводів, а також об'єму пневматичних магістралей вузла видуву[18,22].

Після завершення видуву здійснюється розкриття прес-форми та вивантаження готової продукції (позиція 6.4, рис. 1.1). На цьому етапі тиск у порожнині форми скидається, а сформована ПЕТ-пляшка виводиться із зони формування.

## **1.2. Особливості систем керування мехатронною системою приводу вузла видуву обладнання для формування ПЕТ-пляшок**

Система керування мехатронною системою приводу вузла видуву є ключовим елементом сучасного обладнання для формування ПЕТ-пляшок, оскільки саме вона забезпечує узгоджену роботу механічних, пневматичних та теплових підсистем у межах одного технологічного циклу.

У загальному випадку система керування ( рис.1.2) вузлом видуву будується на базі програмно-логічного контролера, який реалізує циклове керування процесами, поданими на рис. 1.1 (позиції 6.1–6.6).

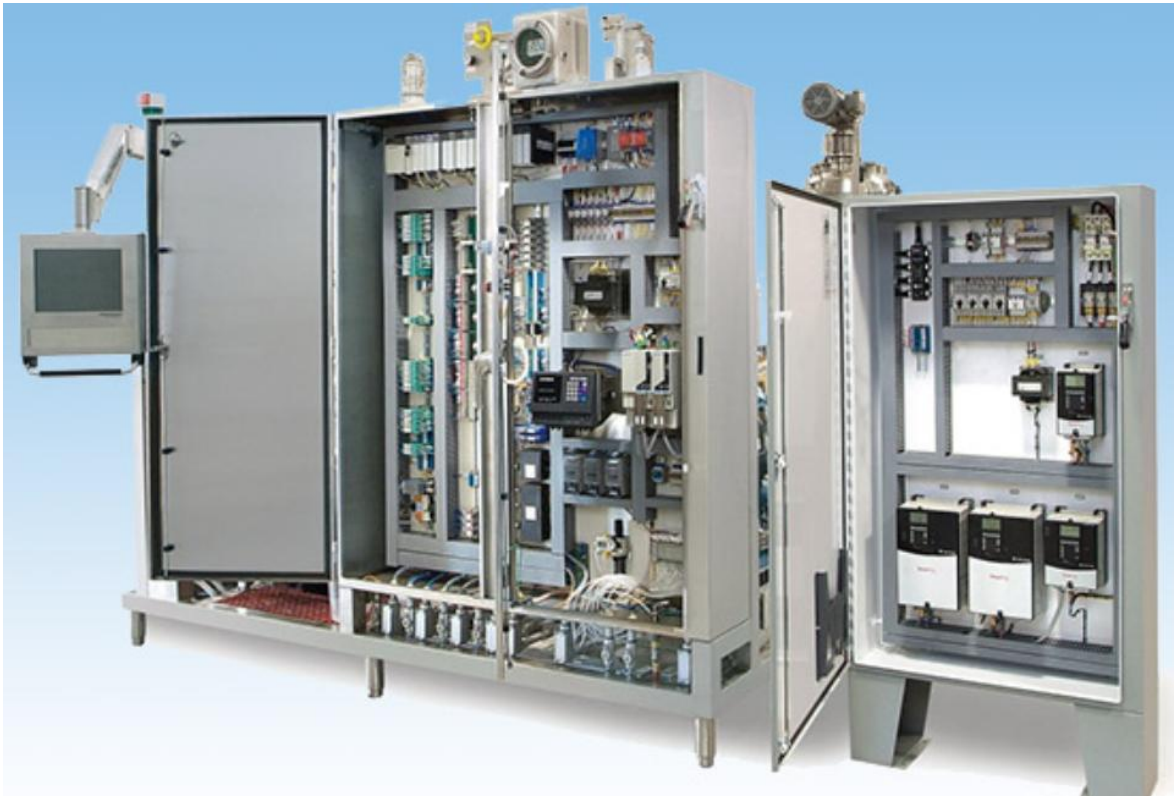


Рис.1.2. Загальний вид стандартної шафи керування PET видувом

Контролер формує керуючі сигнали для виконавчих елементів приводу штока розтяжки, клапанів подачі повітря передвидуву та основного видуву, а також координує роботу механізму закриття прес-форми. При цьому система керування функціонує в режимі жорсткої часової синхронізації зі SCADA (рис.1.3), де відхилення навіть на частки секунди можуть призвести до порушення умов біаксіальної орієнтації матеріалу[15].

У загальному випадку система керування вузлом видуву ПЕТ-пляшок реалізується у вигляді окремої шафи керування, яка є центральним елементом інтеграції електричних, пневматичних і мехатронних підсистем машини та забезпечує реалізацію циклового алгоритму формування виробу. До складу такої шафи входить програмно-логічний контролер (PLC) провідних промислових

виробників, модулі дискретного й аналогового вводу-виводу, засоби керування електропневматичними клапанами високого тиску, приводом штока розтяжки та механізмом замикання прес-форми, а також, за необхідності, частотні перетворювачі або серводрайвери допоміжних приводів. Взаємодія оператора із системою здійснюється через панель НМІ, що дозволяє задавати технологічні параметри, контролювати тиск і тривалість окремих фаз та здійснювати діагностику аварійних режимів, тоді як системи живлення, захисту й безпеки гарантують надійну та безпечну експлуатацію обладнання. Керування вузлом видуву відбувається в режимі жорсткої часової синхронізації, за якої PLC забезпечує точне узгодження моментів передвидуву, переміщення штока розтяжки, подачі повітря основного видуву та замикання прес-форми; при цьому навіть мінімальні часові відхилення можуть порушувати умови біаксіальної орієнтації ПЕТ-матеріалу та негативно впливати на однорідність товщини, міцність і геометричну стабільність готової пляшки [4,8,14].

Загальна класифікація систем керування вузлами формування ПЕТ пляшок, наведена на рис. 1.4.

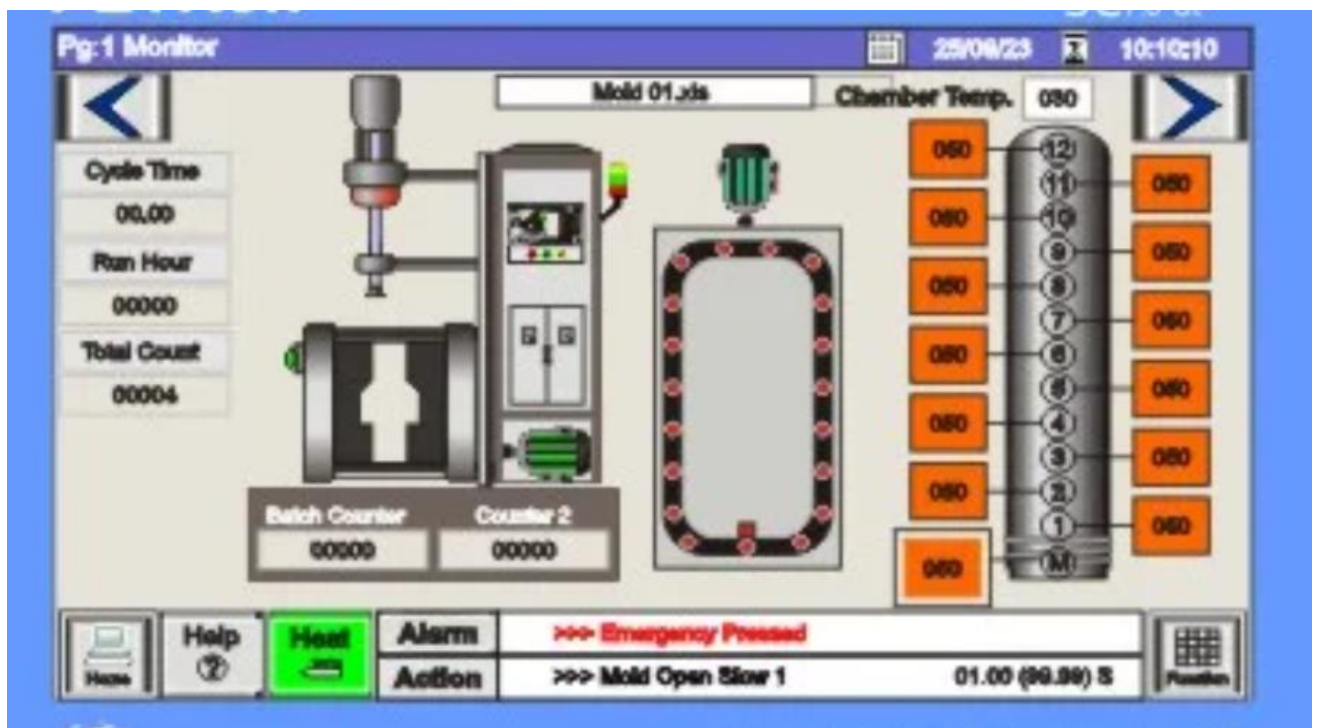


Рис.1.3. Приклад Scada системи підтримки системи керування

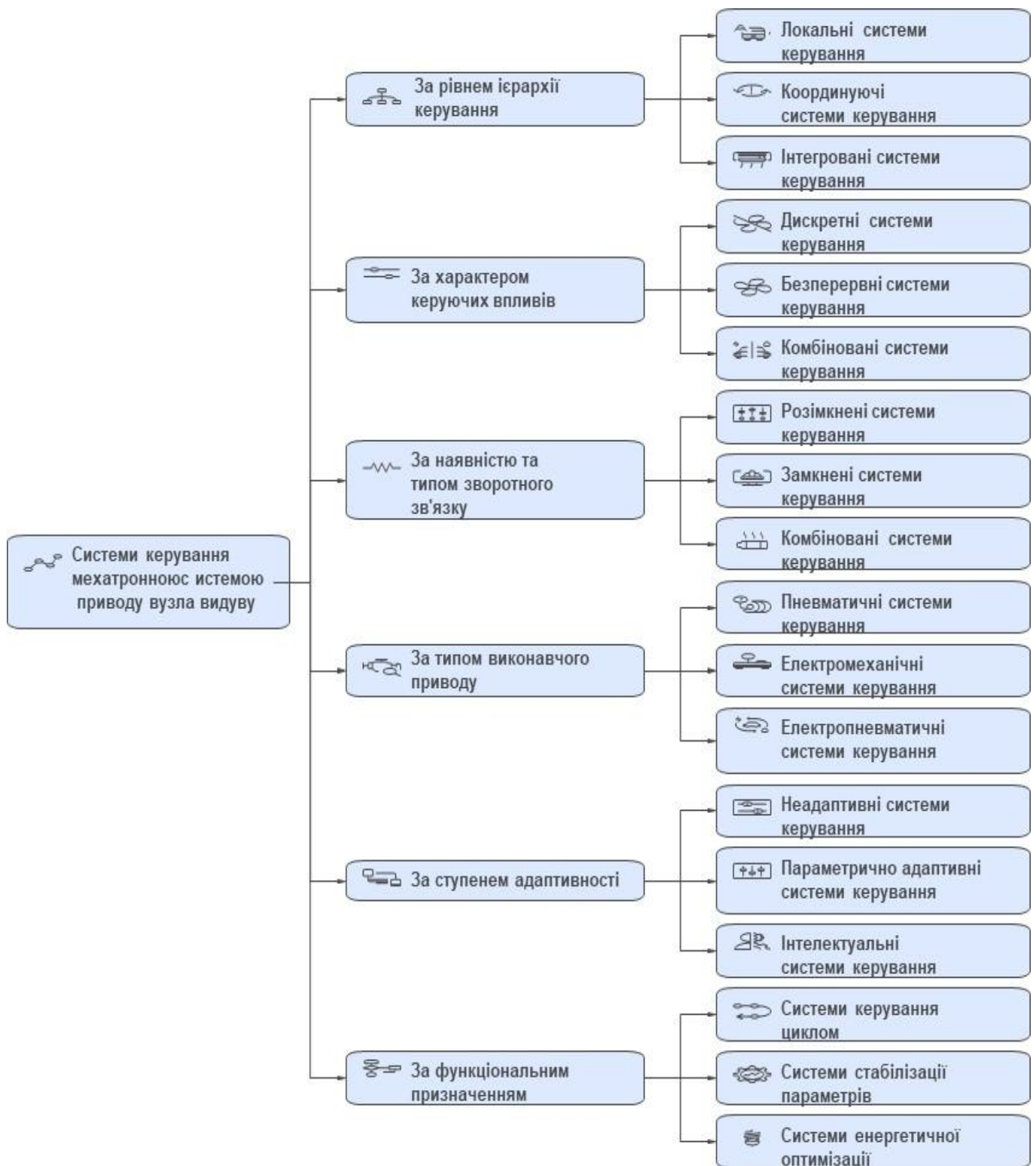


Рис. 1.4. Класифікація систем керування мехатронною системою приводу вузла видуву

В умовах двоступеневого розтягувально-видувного формування стабільність геометричних та міцнісних характеристик готової пляшки визначається не лише конструкцією вузла видуву, а й алгоритмами керування тиском, швидкістю розтяжки та часовою синхронізацією окремих операцій [8,25].

Особливістю керування вузлом видуву є необхідність формування заданого профілю тиску в порожнині преформи. Технологічний цикл, як правило, включає стадії передвидуву, основного видуву, витримки та скидання тиску. Для кожної з цих стадій задаються індивідуальні параметри тиску та тривалості, що реалізуються через пневматичні клапани з електричним керуванням. У реальних умовах динаміка наростання тиску залежить не лише від заданого значення, а й від швидкодії клапанів, стисливості повітря та наявності «мертвого» об'єму в пневматичних магістралях, що ускладнює забезпечення повторюваності циклу.

Важливою складовою мехатронної системи є привід штока розтяжки, який може виконуватися на базі пневматичного або сервомеханічного приводу. Система керування задає траєкторію руху штока, його швидкість та моменти початку й завершення розтяжки. Особливістю цього приводу є необхідність синхронізації механічного переміщення з подачею повітря передвидуву (позиція 6.4, рис. 1.1). Невідповідність цих процесів призводить до нерівномірного розподілу матеріалу, локальних перенапружень та зниження якості пляшки.

Керування вузлом видуву також тісно пов'язане з тепловими умовами формування. Хоча піч розігріву конструктивно розташована поза вузлом видуву (позиція 4, рис. 1.1), система керування повинна враховувати температурний стан преформи як початкову умову процесу деформації. У практиці це реалізується через рецептурний підхід, коли для кожного типу пляшки задається сукупність параметрів: температурний профіль, тиск передвидуву, тиск основного видуву та швидкість розтяжки. Таким чином, мехатронна система керування забезпечує адаптацію вузла видуву до різних типорозмірів і форм виробів без зміни конструкції обладнання.

Окремою особливістю сучасних систем керування є інтеграція функцій діагностики та енергозбереження. Контролер здійснює моніторинг тиску, часу спрацювання клапанів, положення штока та стану прес-форми, що дозволяє виявляти відхилення в роботі вузла видуву на ранніх стадіях. У ряді конструкцій застосовуються алгоритми керування з рекуперацією стисненого повітря після завершення стадії основного видуву, що знижує енергоспоживання та стабілізує тиск у пневматичній системі [17,21,22].

Таким чином, система керування мехатронною системою приводу вузла видуву є багаторівневою і багатопараметричною. Вона забезпечує узгоджену роботу пневматичного приводу, механізму розтяжки та прес-форми з урахуванням теплового стану преформи та динамічних властивостей пневмосистеми. Аналіз і вдосконалення таких систем керування є необхідною передумовою підвищення стабільності технологічного процесу та якості ПЕТ-пляшок, що обґрунтовує актуальність дослідження мехатронної системи приводу вузла видуву в межах даної магістерської роботи[22].

### 1.3. Практичні аспекти процесу видуву ПЕТ-пляшок

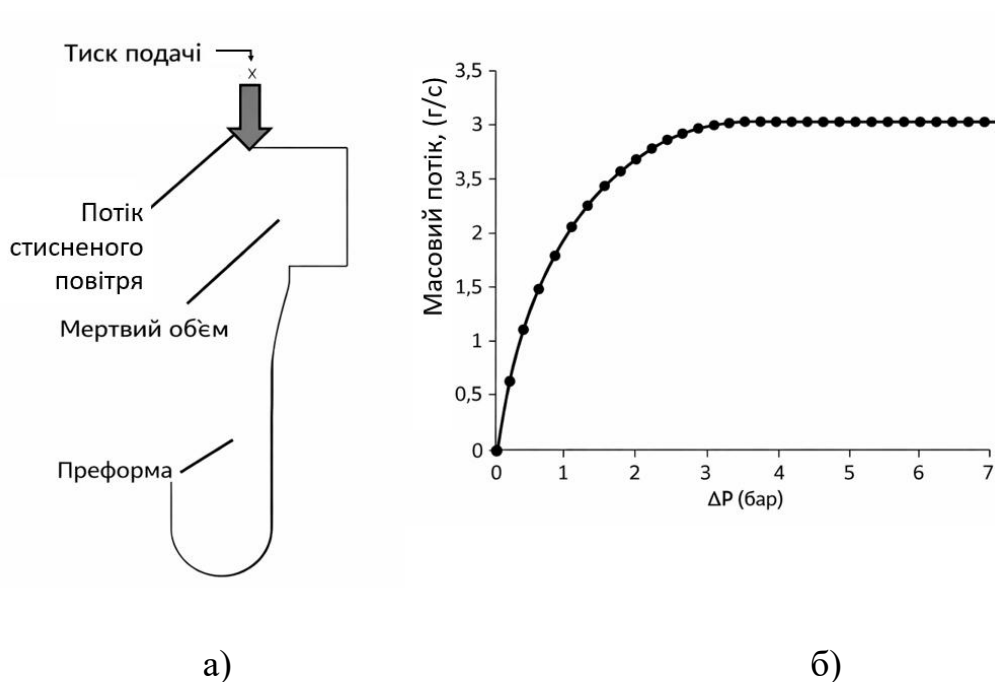


Рис.1.5. Схема процесу формування порожнини преформи: а) елементи преформи, б) залежність масового потоку повітря від перепаду тиску  $\Delta P$ .

На рис. 1.5 наведено узагальнену схему формування порожнини преформи з урахуванням підвідного тиску, масового потоку стисненого повітря, «мертвого» об'єму пневматичної системи та геометрії преформи, а також експериментальну залежність масового потоку повітря від перепаду тиску  $\Delta P$ . Аналіз наведених даних дозволяє виділити низку принципових особливостей і проблем, притаманних системам видуву ПЕТ-пляшок[5].

Першою суттєвою особливістю є невідповідність між тиском у магістралі подачі та фактичним тиском у порожнині преформи. Як показано експериментально (рис.1.3,б) [7], тиск у преформі формується не безпосередньо значенням тиску подачі, а є результатом динамічної взаємодії масового потоку повітря, об'єму порожнини та характеристик пневматичних обмежувальних елементів. Дослідження доводять, що в реальних умовах тиск у преформі може суттєво відрізнитися від лінійного тиску, особливо на початковій стадії видуву, що ускладнює використання спрощених моделей із «заданим тиском».

Другою ключовою проблемою є вплив так званого «мертвого» об'єму, який на рис. 1.5 показаний між керуючим клапаном і порожниною преформи. Експериментально встановлено, що величина цього об'єму може бути співрозмірною або навіть значно більшою за об'єм самої преформи чи готової пляшки. Для досліджуваної промислової машини [7,11] величина мертвого об'єму становила близько 670 мл, що приблизно у 30 разів перевищує початковий об'єм преформи. Ігнорування цього фактору призводить до суттєвих похибок у визначенні масового потоку та, відповідно, до неправильного прогнозування тиску в порожнині під час видуву

Третьою важливою особливістю, що впливає з графіка на (рис.1.3,б), є нелінійний характер залежності масового потоку повітря від перепаду тиску  $\Delta P$ . У діапазоні малих значень  $\Delta P$  спостерігається різке зростання масового потоку, після чого настає режим насичення, пов'язаний із досягненням умов «choked» потоку.

У цьому режимі масовий потік стає практично незалежним від тиску в порожнині преформи та визначається лише параметрами повітря до обмежувального елемента. Подальше зростання тиску в порожнині призводить до переходу в незахлинутий режим, де масовий потік починає зменшуватися за складним нелінійним законом [23-29].

Четверта проблема пов'язана з динамікою наростання тиску та виникненням локальних піків (overshoot). За високих значень масового потоку в експериментах спостерігались короткочасні перевищення тиску, які автори пов'язують із хвильовими явищами та ударними процесами в пневматичній системі. Такі ефекти не відтворюються стандартними інженерними моделями з використанням спрощених засобів моделювання та можуть бути адекватно описані лише із залученням методів обчислювальної газодинаміки. У реальному процесі видуву ці піки частково згладжуються за рахунок деформації преформи, однак вони залишаються потенційним джерелом нестабільності та дефектів формування

П'ятою суттєвою особливістю є термодинамічна неідеальність процесу пресуризації. Вимірювання температури повітря в порожнині показали, що процес не є строго ізотермічним або адіабатичним, а має квазіадіабатичний характер із політропним показником у межах 1–1,4 залежно від швидкості наповнення. Це означає, що під час видуву має місце додаткове нагрівання повітря внаслідок стискання та втрат енергії, а також теплообмін з гарячою преформою, що додатково ускладнює керування тиском

Таким чином, аналіз рис. 1.5 та експериментальних даних свідчить, що система видуву ПЕТ-пляшок є динамічною, нелінійною та багатофакторною мехатронною системою, у якій кінцевий тиск у порожнині визначається не заданим значенням тиску подачі, а масовим потоком повітря, величиною мертвого об'єму, режимом течії та термодинамічними умовами процесу.

Це обґрунтовує необхідність дослідження та вдосконалення саме мехатронної системи приводу вузла видуву, з акцентом на керування масовим

поток, компенсацію впливу мертвих об'ємів і забезпечення стабільності тиску в умовах швидкоплинних перехідних процесів [18].

#### 1.4. Загальні технічні рішення конструювання модулів видуву

На рис. 1.6 зображено робочу станцію вузла видуву лінійної інжекційно-розтягувально-видувної машини у фазі завершення формування ПЕТ-пляшки з преформи. На фотографії зафіксовано два суміжні гнізда: у лівому гнізді представлено сформовану пляшку, що перебуває в прес-формі, у правому — преформу на проміжній стадії технологічного циклу [22,24,27].



Рис.1.6. Станція видуву лінійної інжекційно-розтягувально-видувної машини (ISBM)

Конструктивно вузол видуву складається з двох роз'ємних половин прес-форми, механізмів їх замикання та системи охолодження, що забезпечують формування остаточної геометрії виробу та стабілізацію його розмірів. Утримання преформи і готової пляшки здійснюється за горлову частину за

допомогою захватів, що виключає механічний контакт із корпусом виробу та знижує ризик деформацій.

У центральній частині вузла розміщено видувну головку зі штоком розтяжки, через яку реалізується поздовжня деформація розігрітої преформи та подача стисненого повітря для передвидуву й основного видуву. Саме цей елемент є складовою мехатронної системи приводу вузла видуву та визначає динаміку процесу формування пляшки.

Видимі силові та напрямні елементи забезпечують синхронізовану роботу механізмів замикання прес-форми, переміщення штока розтяжки та позиціонування виробу в межах робочої зони. Загалом наведений вузол ілюструє інтеграцію механічних, пневматичних і керувальних підсистем, характерну для сучасних лінійних машин видуву ПЕТ-пляшок, і може бути використаний як типовий приклад конструктивної реалізації мехатронної системи приводу вузла видуву [29].

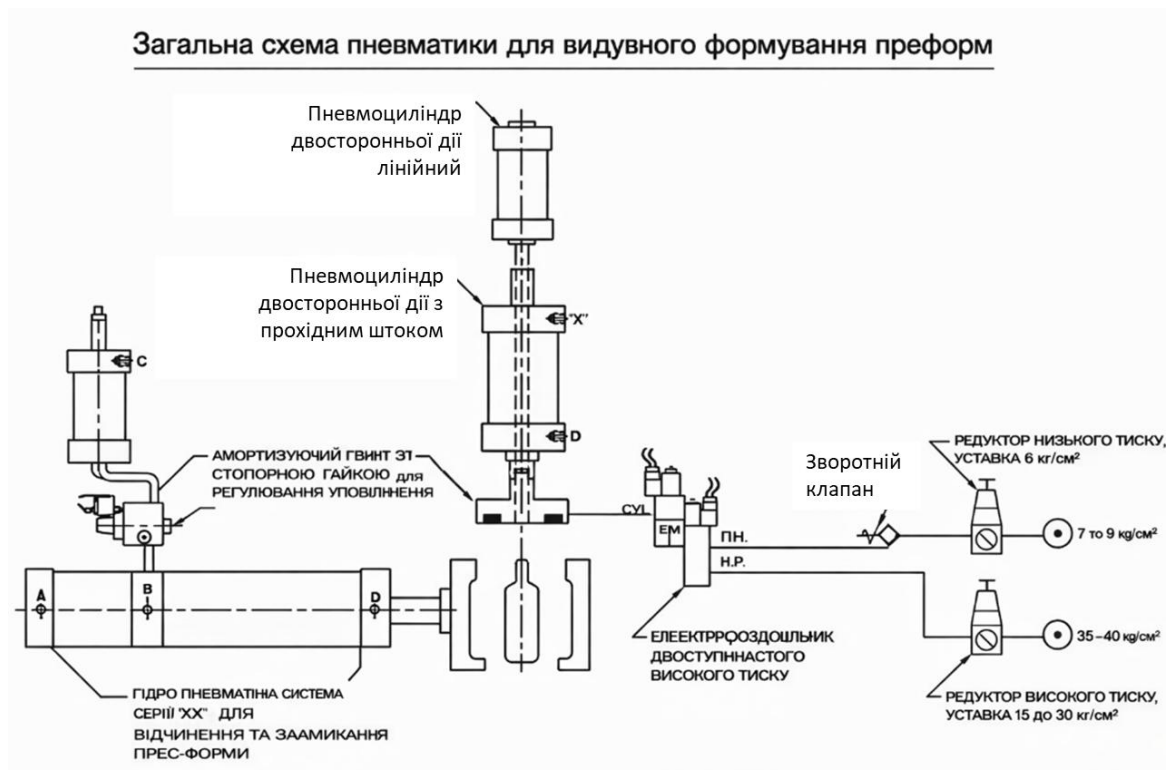


Рис.1.6. Схема вузла видувного формування

На (рис.1.6) наведено узагальнену пневматичну схему керування вузлом видуву інжекційно-розтягувально-видувної машини, яка відображає структурну та функціональну взаємодію основних виконавчих і керувальних елементів мехатронної системи приводу. Представлена схема є типовою для сучасних машин формування ПЕТ-пляшок із преформ та використовується для реалізації послідовних етапів передвидуву, основного видуву і скидання тиску [29].

У верхній частині схеми показано пневмоциліндр двосторонньої дії лінійного типу, який забезпечує осьове переміщення штока розтяжки. Його робота синхронізується з пневмоциліндром двосторонньої дії з прохідним штоком, що виконує функцію герметизації горловини преформи в прес-формі та формування замкненого об'єму для подачі стисненого повітря. Така компоновка дозволяє розділити механічну функцію розтягування і пневматичну функцію видуву, що є характерною ознакою сучасних мехатронних вузлів видуву.

Представлена гідропневматична система (рис.1.6) призначена для відкривання, замикання та фіксації прес-форми. Наявність амортизуючого гвинта зі стопорною гайкою забезпечує регулювання уповільнення руху та зменшення ударних навантажень у кінцевих положеннях, що підвищує ресурс механічних елементів і стабільність роботи вузла.

Подача стисненого повітря до порожнини преформи здійснюється через електропневматичний розподільник двоступеневого високого тиску, який забезпечує окремі канали для передвидуву та основного видуву. Лінія низького тиску формується за допомогою редуктора низького тиску з уставкою близько 6 кг/см<sup>2</sup>, тоді як лінія високого тиску оснащена редуктором з уставкою 15–30 кг/см<sup>2</sup> і призначена для інтенсивного формування остаточної геометрії пляшки. Зворотний клапан у пневматичній магістралі запобігає

зворотному перетіканню повітря та стабілізує тиск у системі під час швидкоплинних перехідних процесів [21-27] .

На рис. 1.7. наведені типові елементи системи керування у машині видуву ПЕТ пляшок.

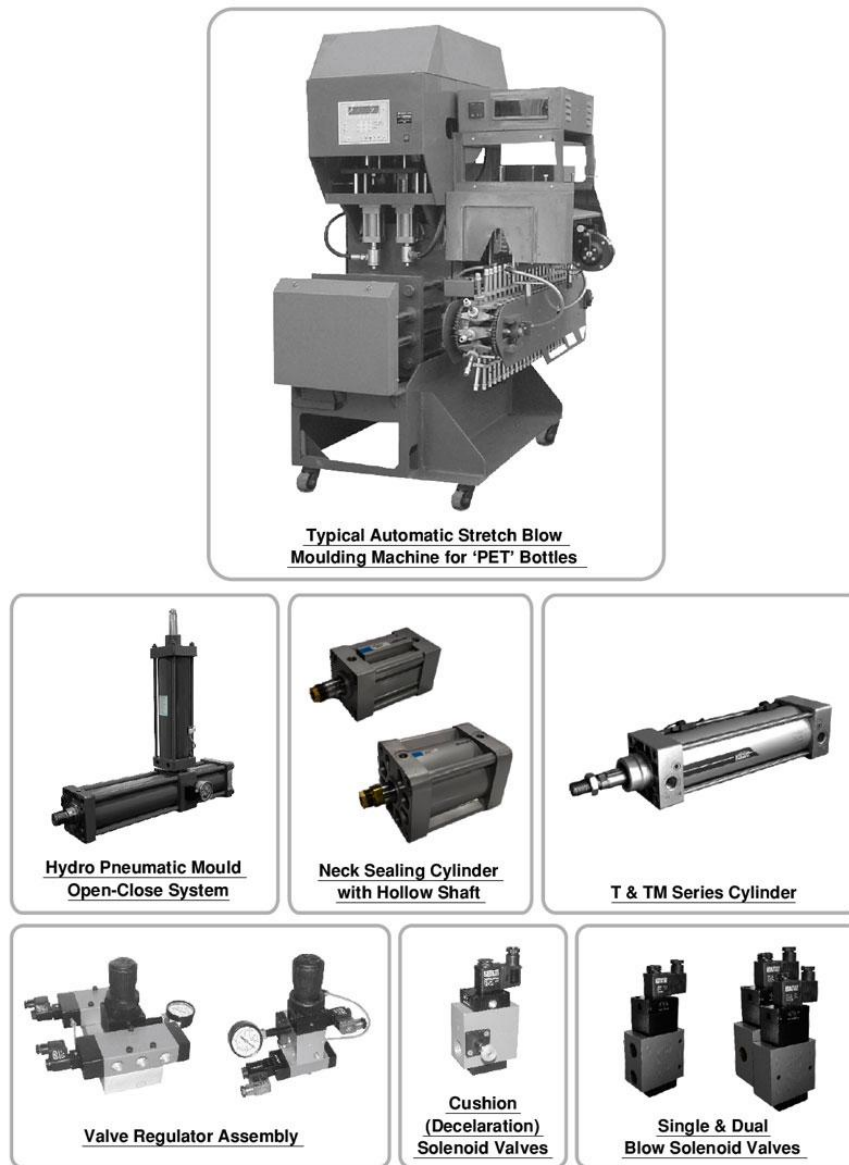


Рис.1.7. Приклад елементів в системі керування розтягувально-видувного формування ПЕТ-пляшок

На рис.1.7. представлено типову автоматичну машину розтягувально-видувного формування ПЕТ-пляшок (Automatic Stretch Blow Moulding Machine) разом із ключовими вузлами її мехатронно-пневматичної системи, що забезпечують процес формування тари.

У верхній частині зображення показано загальний вигляд автоматичної видувної машини, яка включає зону нагріву преформ, вузол розтяжки та видуву, механізм замикання прес-форми й систему керування. Конструкція машини орієнтована на циклічну роботу з високою точністю синхронізації стадій передвидуву, основного видуву та механічного розтягування преформи.

Також на рис.1.7. наведено основні виконавчі та регулювальні елементи пневматичного приводу автоматичної машини розтягувально-видувного формування ПЕТ-пляшок, зокрема:

- гідропневматичний привід відкривання-закривання прес-форми, який забезпечує необхідне зусилля замикання при дії високого тиску видувного повітря;
- пневмоциліндр герметизації горловини з порожнистим штоком, що виконує функцію ущільнення та центрування преформи під час подачі повітря;
- лінійні пневмоциліндри серій Т та ТМ, які застосовуються для допоміжних переміщень і механізмів синхронізації;
- вузол регулювання клапанів, що дозволяє налаштовувати тиск і витрату повітря на різних стадіях процесу;
- електромагнітні клапани з демпфуванням (cushion), призначені для зменшення ударних навантажень і стабілізації перехідних процесів;
- одинарні та подвійні клапани видуву, які реалізують роздільне керування передвидувом і основним видувом.

У сукупності зображені елементи формують інтегровану пневматично-мехатронну систему вузла видуву, характерну для сучасних машин формування ПЕТ-пляшок у харчовій промисловості, де ключовими вимогами є висока повторюваність циклу, стабільність тиску та надійність роботи при високих навантаженнях. Класифікація подібних структур наведена на рис.1.8.

## Пневматичні компоненти у виробництві ПЕТ-пляшок



Рис.1.8. Класифікація елементів виконавчі та регулювальні елементи пневматичного приводу автоматичної машини розтягувально-видувного формування ПЕТ-пляшок

Відповідно, кінцеві параметри процесу видуву — швидкість наростання тиску, профіль подачі повітря та синхронізація руху штока розтяжки —

визначаються не окремими компонентами, а узгодженою роботою всієї системи керування.

### **1.5. Обґрунтування власної пропозиції**

Аналіз технологічного процесу формування ПЕТ-пляшок і конструктивних особливостей вузла видуву показав, що стабільність геометричних і міцнісних характеристик готової тари значною мірою визначається роботою мехатронної системи приводу вузла видуву.

У двоступеневому розтягувально-видувному формуванні вирішальну роль відіграють не лише задані значення тиску стисненого повітря, а й динаміка його подачі, профіль зміни тиску в часі та синхронізація з рухом штока розтяжки.

Як встановлено із здійсненого аналізу існуючих технічних рішень технології видуву, реальні процеси подачі та стабілізації тиску мають нелінійний і перехідний характер, зумовлений інерційністю пневматичної системи, наявністю мертвих об'ємів і обмеженою швидкодією клапанної апаратури. Використання спрощених схем керування, орієнтованих лише на фіксовані уставки тиску, не забезпечує необхідної відтворюваності процесу видуву та призводить до коливань якості готових виробів.

У зв'язку з цим у роботі обґрунтовується доцільність дослідження мехатронної системи приводу вузла видуву як єдиного інтегрованого комплексу, що поєднує пневматичний привід, механізм розтяжки та систему керування. Власна пропозиція полягає у використанні керованої двоступеневої подачі повітря з передвидувом та основним видувом у поєднанні з алгоритмічним керуванням часовими параметрами і синхронізацією руху штока розтяжки. Такий підхід дозволяє врахувати динамічні властивості пневматичної системи, підвищити стабільність процесу та забезпечити повторюваність режимів формування.

Таким чином, подальше дослідження і вдосконалення мехатронної системи приводу вузла видуву є доцільним з точки зору підвищення якості

ПЕТ-пляшок і ефективності роботи обладнання, що визначає актуальність обраної теми магістерської роботи.

## **Висновки до розділу 1**

На основі опрацювання наукових публікацій, навчальних видань і технічної документації провідних світових виробників пакувального обладнання встановлено, що якість та стабільність параметрів готової ПЕТ-тари істотно залежать від динаміки подачі стисненого повітря, точності керування тиском і узгодженості роботи пневматичних, механічних та керувальних підсистем.

Розглянуто основні етапи технологічного процесу видувного формування ПЕТ-пляшок, визначено функціональне призначення вузла видуву та проаналізовано його конструктивні схеми.

Окрему увагу приділено класифікації систем керування вузлами видуву та аналізу сучасних підходів до стабілізації тиску в пневматичних приводах. Встановлено, що перехід від традиційних пневматичних схем до інтегрованих мехатронних рішень із використанням керованих клапанів, датчиків тиску та програмованих контролерів дозволяє підвищити повторюваність режимів видуву, зменшити втрати енергії та забезпечити адаптацію обладнання до змін технологічних параметрів.

У результаті проведеного огляду виявлено недостатню кількісну оцінку впливу конструктивних і режимних параметрів пневматичної системи на динаміку процесу видуву, що зумовлює актуальність подальших теоретичних, розрахункових і експериментальних досліджень. Зроблені у розділі 1 узагальнення стали підґрунтям для формування мети, завдань і методики дослідження, а також визначили напрям подальшого аналізу та обґрунтування параметрів мехатронної системи приводу вузла видуву, що реалізовано в наступних розділах магістерської роботи.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРАХУНКОВО-АНАЛІТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ

#### 2.1. Визначення основних параметрів і конструктивних елементів

На основі аналізу існуючих систем керування системою роздуву [8-10, 12-14] на базі пневматичної схеми керування вузлом видуву ПЕТ-пляшок, наведеної на рис. 2.1, виконано визначення основних параметрів та конструктивних елементів мехатронної системи приводу, що забезпечує реалізацію стадій передвидуву, основного видуву та керованого скидання тиску [12].

Загальна структура вузла видуву сформована як багатоканальна пневматична система з централізованою подачею стисненого повітря та індивідуальними керувальними лініями для кожної формувальної позиції. Джерелом енергії системи є магістраль стисненого повітря з робочим тиском 2,0–2,6 МПа, що відповідає вимогам високошвидкісних видувних машин для формування ПЕТ-тари.

У складі вузла передбачено два функціонально відокремлені контури тиску:

1. контур низького тиску (LP), призначений для стадії передвидуву, з регульованим робочим тиском у діапазоні 0,6–1,0 МПа;
2. контур високого тиску (HP), що забезпечує основний видув, з робочим тиском до 3,5–4,0 МПа (35–40 бар [1]).

Формування необхідних параметрів у кожному контурі здійснюється за допомогою редукторів тиску, ресиверів вирівнювання пульсацій та зворотних клапанів, що запобігають перетіканню повітря між каналами при перехідних режимах.

Ключовими виконавчими елементами пневматичної системи є електропневматичні розподільники високого тиску типу 3/2 або 2×3/2, які

забезпечують швидкодіючий перехід між режимами передвидуву, основного видуву та скидання тиску. Застосування спеціалізованих клапанів високого тиску дозволяє мінімізувати втрати тиску та забезпечити необхідну витратну характеристику повітряного потоку в умовах короткочасних імпульсів.

Кожна формувальна позиція оснащена локальним вузлом подачі повітря, що включає:

- керувальний електропневматичний клапан;
- дросель або калібрований отвір для формування профілю наростання тиску;
- канал скидання тиску з атмосферним виходом;
- формувальну головку з герметизацією горловини преформи.

Синхронізація пневматичних процесів із механічним переміщенням штока розтягування здійснюється за рахунок взаємодії пневматичної системи з мехатронним приводом осьового розтягування преформи. Це забезпечує узгодження швидкості розтягування з інтенсивністю подачі повітря, що є критично важливим для формування однорідної товщини стінки ПЕТ-пляшки.

Таким чином, пневматичний вузол видуву, запропонований для подальшого дослідження на рис. 2.1, є складною багатопараметричною системою, у якій конструктивні елементи та робочі параметри взаємопов'язані між собою.

Саме ці параметри — тиск у контурах, витрата повітря, швидкодія клапанів та часові затримки — визначають динаміку процесу видуву і підлягають подальшому розрахунку та оптимізації.

Окремої уваги потребує також і обґрунтування конструктивного виконання клапанної апаратури вузла видуву та визначення оптимального співвідношення її основних параметрів, які безпосередньо впливають на динаміку формування тиску в порожнині преформи. З

окрема, швидкодія електропневматичних клапанів високого тиску, їх прохідний переріз, об'єм внутрішніх порожнин, а також довжина і діаметр підвідних пневматичних каналів визначають інтенсивність наростання масового потоку повітря та характер перехідних процесів у системі [14].

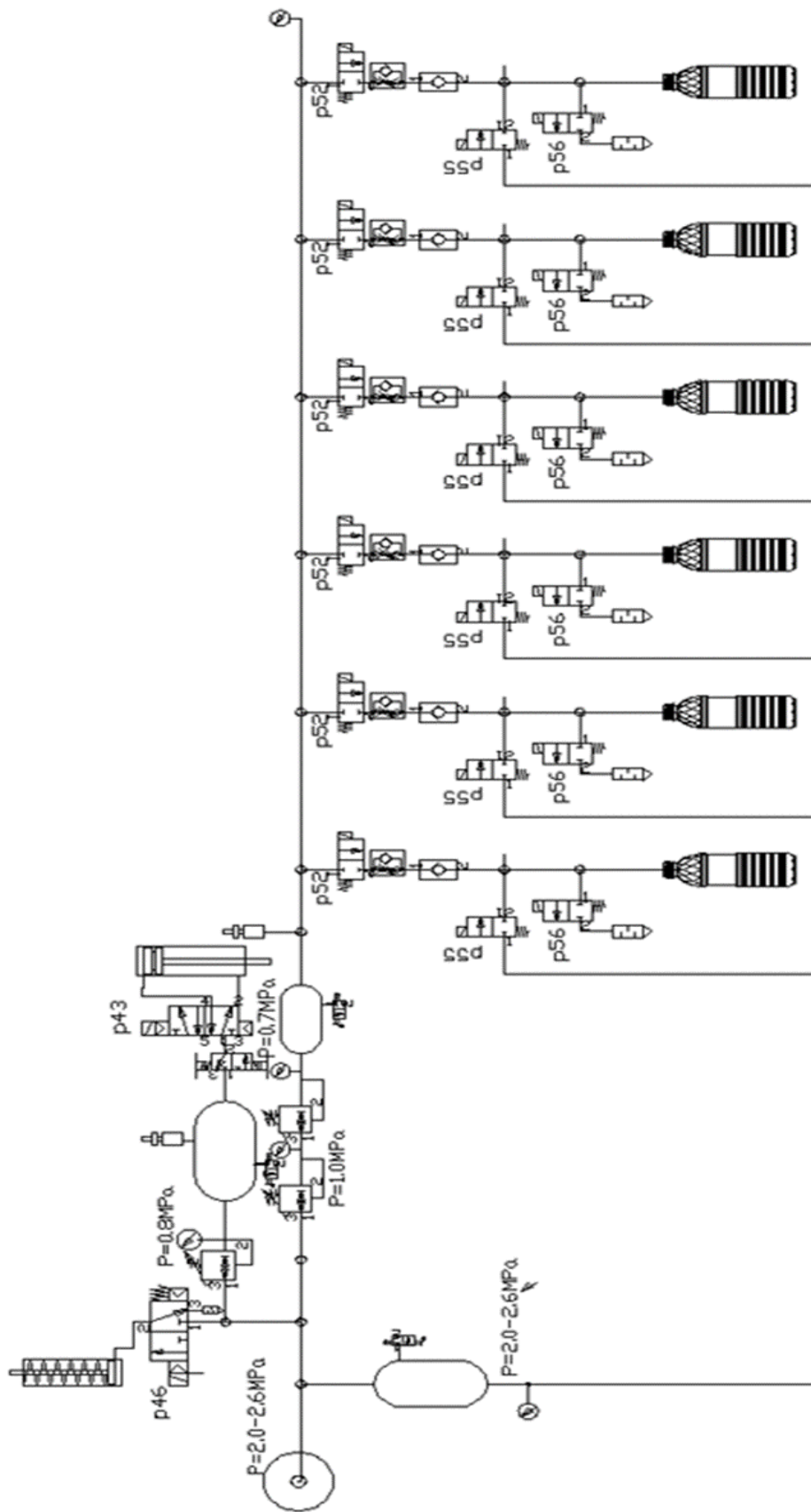


Рис. 2.1. Принципова електропневматична схема керування блоком видуву

Невідповідний вибір цих параметрів призводить до запізнення або перевищення тиску на початкових стадіях видуву, що негативно позначається на рівномірності розподілу матеріалу та якості готової ПЕТ-пляшки. У зв'язку з цим наступний етап роботи спрямований на розрахунок і оптимізацію конструктивних параметрів клапанів та пневматичних елементів з метою встановлення їх раціонального співвідношення, яке забезпечує стабільну динаміку процесу видуву та узгоджену роботу мехатронної системи приводу в цілому [17].

## 2.2. Обґрунтування конструкції клапанної системи та розрахунок параметрів пневмоприводу вузла видуву

Вихідні параметри до розрахунку, наведені в табл.2.1., на базі схеми 2.2.

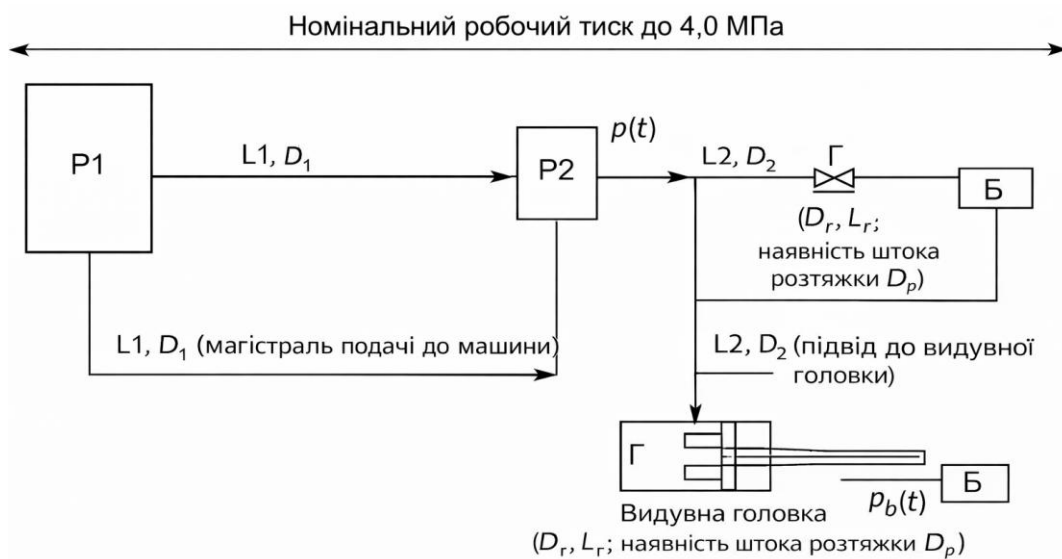


Рис.2.2. Розрахункова схема мережі видуву

На рис. 2.2, наведено структурну пневматичну систему, що складається з магістрального ресивера  $P_1$ , який забезпечує стабільне джерело стисненого повітря з номінальним робочим тиском до 4,0 МПа, та проміжного ресивера  $P_2$ , безпосередньо встановленого на машині видуву. Ресивери з'єднані між собою магістраллю подачі повітря з довжиною  $L_1$  та внутрішнім діаметром  $D_1$ , яка моделює трубопровідну систему подачі повітря від компресорної станції до

машини. Проміжний ресивер  $P_2$  виконує функцію акумулювання стисненого повітря та згладжування пульсацій тиску, що виникають у циклічному режимі роботи машини. Із ресивера  $P_2$  повітря подається до вузла видуву через підвідну лінію довжиною  $L_2$  та діаметром  $D_2$ , у якій встановлено запірно-регулювальний клапан  $\Gamma$ . Даний клапан забезпечує керовану подачу повітря до видувної головки та формує часову залежність тиску  $p(t)$  на вході у зону видуву.

Видувна головка характеризується геометричними параметрами внутрішніх каналів — діаметром горловини  $D$  г, довжиною каналу  $L$  г, а також наявністю штока розтяжки діаметром  $D_p$ , який зменшує ефективний прохідний переріз для потоку стисненого повітря.

Саме в порожнині видувної головки та преформи формується тиск  $p_b(t)$ , який безпосередньо визначає інтенсивність радіального розширення заготовки та кінцеві геометричні параметри ПЕТ-пляшки. Таким чином, досліджувана система являє собою ланцюг послідовно з'єднаних об'ємів і дроселюючих елементів, у якому перехідні процеси подачі та скидання тиску визначаються параметрами ресиверів  $P_1$  і  $P_2$ , геометрією трубопроводів  $L_1, D_1, L_2, D_2$ , а також характеристиками клапана  $\Gamma$  та видувної головки. Аналіз динаміки тиску в такій системі дозволяє встановити раціональні співвідношення між зазначеними параметрами з метою забезпечення стабільного, керованого та енергоефективного процесу видуву ПЕТ-пляшок.

### **2.3. Розрахунок масових витрат повітря в докритичному режимі витікання стисненого повітря**

Масовий витрат повітря при докритичному режимі витікання (режим, за якого відношення тиску в порожнині витікання до тиску в ресивері перевищує 0,528) визначається за формулою [1,5]:

$$G_{II} = f_{\text{э}} \cdot P_p \cdot \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{\sigma^{2/k} - \sigma^{(k+1)/k}}{RT}}, \text{ (кг/с)} \quad (2.1)$$

де :

$f_{\text{э}}$  – ефективна площа прохідного перерізу пневмомагістралі, м<sup>2</sup>.

$P_p$  – тиск у порожнині, з якої відбувається витікання повітря, Па.

$k$  – показник адіабати повітря (для повітря  $k=1,4$ );

$\sigma$  – безрозмірна величина, що характеризує відношення тиску в порожнині витікання до тиску в порожнині наповнення:

$$\sigma = \frac{P_B}{P_p}, \quad (2.2)$$

$R$  – універсальна газова стала для повітря, (287 Дж/(кг·К)).  $T$  – абсолютна температура повітря в магістралі, К.

Масові витрати повітря при критичному режимі витікання (коли відношення тиску в порожнині витікання до тиску в ресивері менше або дорівнює 0,528) визначається за спрощеною залежністю:

$$G_H = 0,00236 f_{\text{э}} \cdot P_p \quad (2.3)$$

Для визначення ефективної площі прохідного перерізу використовується співвідношення:

$$f_{\text{э}} = \mu \cdot f \quad (2.4)$$

$f$  – геометрична площа поперечного перерізу трубопроводу, м<sup>2</sup>,  $\mu$  – коефіцієнт витрати трубопроводу.

Коефіцієнт витрати  $\mu$  визначається експериментальним шляхом і залежить від величини коефіцієнта гідравлічного опору  $\xi$ . Для його розрахунку використовується вираз:

$$\mu = f(\xi) \quad (2.5)$$

$$\xi = \frac{\lambda_{\text{ПР}} \cdot l_{\text{ТР}}}{2d_{\text{T}}} \quad (2.6)$$

де:

$\lambda_{\text{ПР}}$  – приведена довжина трубопроводу (для пластикових трубопроводів приймається як 0,01).

$l_{\text{ТР}}$  – довжина трубопроводу, м.

$d_{\text{T}}$  – внутрішній діаметр трубопроводу, м.

Для підвищення точності розрахунків часу наповнення пляшки у подальшому враховується об'єм трубопроводу, що з'єднує проміжний ресивер  $P_2$ , з пляшкою. Це реалізується шляхом визначення еквівалентного об'єму системи «пляшка – підвідний трубопровід» з урахуванням співвідношення ефективних площ прохідного перерізу підвідного трубопроводу та видувної головки.

Еквівалентний об'єм визначається за наступною формулою[15]:

$$V_{\text{Э}} = V_{\text{Б}} + AV_{L_2} \quad (2.7)$$

де:

$V_{\text{Б}}$  – об'єм наповнюваної пляшки, л,

$V_{L_2}$  – об'єм трубопроводу  $L_2$ , л;

$A$  – коефіцієнт приведення об'ємів.

Для визначення коефіцієнта приведення об'ємів необхідно використовувати наступні безрозмірні параметри:

$\Lambda = \frac{V_{L_2}}{V_{\text{Б}}}$  - коефіцієнт безрозмірного об'єму;

$\Omega = \frac{f_{L2}}{f_{\Gamma}}$  - коефіцієнт безрозмірного опору,

$$A = \frac{V_{L2}}{\sqrt{1 + \Omega^2}} - \frac{0,12 + 0,02\Omega + 0,093\Omega\sigma_{\text{Д}}}{\sigma_{\text{Д}}[\Lambda + 0,148(\Omega - 1,35)^2]} \text{Ln}[4,04(\sigma_{\text{Д}} - \sigma_{\text{А}})] \quad (2.8)$$

Застосуємо формулу (2.8) в наступних діапазонах значень коефіцієнтів [22]:

$\Lambda$  от 0,5 до 100,  $\Omega$  от 0,3 до 10,  $\sigma_{\text{А}}$  от 0,1 до 0,5 и  $\sigma_{\text{Д}}$  до 0,95.

Таблиця 2.1.

Вихідні параметри для розрахунку пневматичної системи видуву ПЕТ-пляшки

№	Параметр	Позначення	Значення	Одиниці	Примітка
1	Робочий тиск у системі	$P_{\text{роб}}$	16	бар	Максимальний у магістралі
2	Тиск формування (видуву)	$P_{\text{ф}}$	14	бар	Тиск у порожнині пляшки під час формування
3	Об'єм формованої пляшки	$V_{\text{б}}$	1,0	л	Номінальний об'єм виробу
4	Об'єм ресивера на машині	$V_{\text{Р2}}$	3,0	л	Проміжний ресивер (Р2)
5	Довжина трубопроводу ресивер–пляшка	$L_2$	1,0	м	Підвід до видувної головки/пляшки
6	Діаметр трубопроводу ресивер–пляшка	$D_2$	10	мм	Внутрішній діаметр
7	Довжина трубопроводу компресор–ресивер	$L_1$	3,0	м	Магістраль подачі до (Р2)
8	Діаметр трубопроводу компресор–ресивер	$D_1$	14	мм	Внутрішній діаметр
9	Діаметр горловини (каналу) пляшки	$D_{\Gamma}$	22	мм	Для видувної головки/входу
10	Діаметр штока розтяжки	$D_{\text{р}}$	10	мм	Впливає на ефективний прохідний переріз
11	Довжина горловини (каналу)	$L_{\Gamma}$	40	мм	Геометрія видувної головки/горловини
12	Приведена довжина (коэф.)	$\lambda_{\text{пр}}$	0,01	–	Для пластикових трубопроводів
13	Час формування	$t_{\text{ф}}$	0,6	с	Тривалість етапу видуву
14	Температура повітря	$T$	293	К	Прийнята стала температура
15	Продуктивність компресора	–	не обмежується	–	Передбачається наявність великого ресивера (Р1)

Отримані результати за даними (2.1)–(2.8) наведені в табл.2.2 – табл.2.4.

Таблиця 2.2.

Енерговитратна характеристика системи видуву ( за рис. 2.2, це  $D_2 \rightarrow$  час заповнення  $\rightarrow$  максимальна витрата)

Діаметр трубопроводу ресивер–пляшка, мм	Час заповнення пляшки, с	Максимальний витрат повітря від компресора, л
10	0,30	7500
12	0,27	8200
14	0,25	8600

Таблиця 2.3.

Вплив об'єму проміжного ресивера на динаміку заповнення пляшки

Об'єм проміжного ресивера, л	Час заповнення пляшки, с	Максимальний витрат повітря від компресора, л
3	0,25	9400
5	0,27	8400
10	0,34	6900
20	0,35	5400
30	0,35	4600

Таблиця 2.4.

Вплив діаметра штока до розтяжки

Діаметр штока розтяжки, мм	Час заповнення пляшки, с	Максимальний витрат повітря від компресора, л
12	0,25	8600
10	0,25	8750
8	0,30	9300

На підставі отриманих даних табл.2.2 – табл.2.4.видно, що зі збільшенням діаметра трубопроводу ресивер–пляшка з 10 до 14 мм спостерігається зменшення часу заповнення пляшки з 0,30 до 0,25 с, що пояснюється зростанням ефективної площі прохідного перерізу та зниженням гідродинамічного опору магістралі. Водночас це супроводжується збільшенням максимального витрату повітря від компресора з 7500 до 8600 л, тобто зростанням пікових навантажень на систему подачі стисненого повітря [25].

Таким чином, збільшення діаметра підвідного трубопроводу позитивно впливає на швидкодію процесу видуву, але призводить до зростання енерговитрат і навантаження на компресорне обладнання. Це підтверджує необхідність компромісного вибору діаметра магістралі з урахуванням вимог до продуктивності та енергоефективності машини.

Збільшення об'єму проміжного ресивера з 3 до 30 л призводить до суттєвого зниження максимального витрату повітря від компресора — з 9400 до 4600 л, що свідчить про ефективне демпфування пікових відборів повітря та стабілізацію тиску в пневматичній системі. Однак при цьому спостерігається зростання часу заповнення пляшки до 0,34–0,35 с, що обмежує можливості застосування великих ресиверів у високопродуктивних машинах.

Отримані результати свідчать, що проміжний ресивер є ключовим елементом енергетичної оптимізації системи видуву, а його надмірне збільшення знижує динамічну швидкодію процесу. Найбільш раціональним є використання ресиверів об'ємом 5–10 л, що забезпечує збалансоване поєднання стабільності тиску та допустимого часу формування пляшки.

Зменшення діаметра штока розтяжки з 12 до 8 мм призводить до збільшення максимального витрату повітря з 8600 до 9300 л та одночасного зростання часу заповнення пляшки до 0,30 с. Така тенденція пояснюється збільшенням ефективного прохідного перерізу в зоні видувної головки, що спричиняє інтенсивніший масовий потік повітря, але водночас погіршує керованість процесу наростання тиску в початковій фазі видуву.

Отже, діаметр штока розтяжки і зв'язаний із даною системою розподільник керування процесом, є чутливими конструктивними елементами, які впливають не лише на механічний процес орієнтованого розтягування преформи, а й на газодинамічні характеристики системи видуву. Дослідження конструкції розподільника видуву потребує проведення експериментального дослідження.

#### 2.4. Розрахунок приводу механізму з'єднання форм роздувної установки

Під час проектування видувної форми для формування ПЕТ-пляшок методом розтягувально-видувного формування необхідно забезпечити узгодженість її геометричних та силових параметрів з характеристиками механізму замикання прес-форми та пневматичного приводу вузла видуву.

Перевірка умови забезпечення замикання напівформ, пов'язана із тим, що на стадії основного видуву під дією високого тиску стисненого повітря в порожнині преформи виникає розпирне зусилля, яке прагне роз'єднати напівформи.

Для гарантованого замикання необхідно, щоб це зусилля не перевищувало допустиме зусилля замикального механізму:

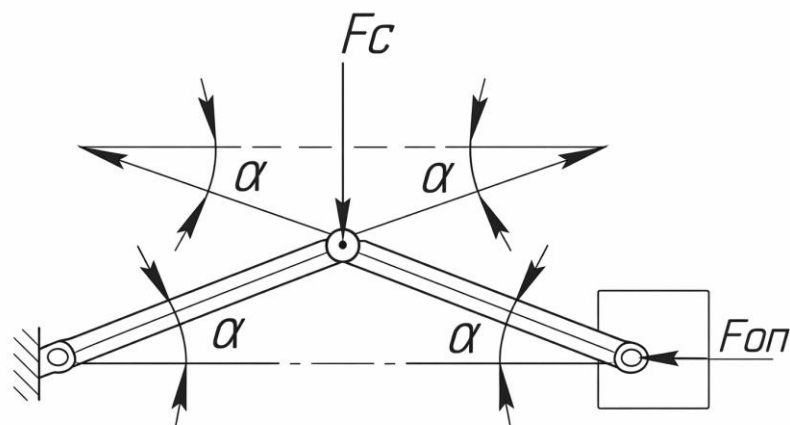


Рис.2.3. Загальна схема навантаження механізму

$$F \leq F_{розп} \leq F_{дон} , \quad (2.9)$$

де  $F_3$  — зусилля замикання напівформ, Н;  $F_{розп}$  — розпірне зусилля від тиску повітря, Н;  $F_{доп}$  — допустиме зусилля механізму замикання, Н.

Формуюча порожнина має бути розташована таким чином, щоб рівнодійна розпірних сил, спричинених тиском повітря, була співнапрямною з головною віссю механізму замикання та проходила через геометричний центр плити. Недотримання цієї умови призводить до перекосів, нерівномірного розподілу контактних напружень між напівформами, підвищеного зносу напрямних та погіршення точності геометрії готової ПЕТ-пляшки.

Розпірне зусилля визначається за формулою:

$$F_{розп} = P \cdot f \cdot n, \quad (2.10)$$

де  $P$  — тиск видувного повітря, Па;

$f$  — площа проєкції формуючої порожнини на площину з'єднання напівформ, м<sup>2</sup>;

$n$  — кількість гнізд у формі.

Враховуючи номінальний тиск основного видуву  $P=4,0$  МПа= $4,0 \cdot 10^6$  Па; площу проєкції формуючої порожнини  $f=0,025$  м<sup>2</sup>; кількість гнізд у формі  $n=6$ , маємо:

$$F_{розп} = 4,0 \cdot 10^6 \cdot 0,025 \cdot 6 = 600\,000 \text{ Н} = 600 \text{ кН}.$$

Отже, сумарне розпірне зусилля, яке діє на вузол замикання прес-форми при основному видуві, становить 600 кН. Отримане значення визначає мінімально необхідний рівень зусилля замикання прес-форми, що забезпечує стабільну роботу вузла видуву в умовах багатогніздової конфігурації з 6 гніздами.

Водночас реальний процес видувного формування характеризується динамічним наростанням і скиданням тиску, наявністю пульсацій у пневматичній системі, температурною неоднорідністю матеріалу преформи та інерційністю мехатронної системи приводу. Зазначені фактори зумовлюють додаткові навантаження на вузол замикання, у зв'язку з чим при проєктуванні доцільно передбачати коефіцієнт запасу за зусиллям замикання на рівні 15–25 %.

Для забезпечення стабільної роботи вузла видуву з урахуванням перехідних процесів, пульсацій тиску та інерційності мехатронної системи вводимо коефіцієнт запасу за зусиллям замикання  $k_z$ .

Приймаючи  $k_z = 1,2$  (тобто 20 % запасу), необхідне розрахункове зусилля механізму замикання становить:  $F_{зрозр} = k_z \cdot F_{розп} = 1,2 \cdot 600 = 720$  кН.

Отже, механізм замикання прес-форми повинен забезпечувати зусилля не менше 720 кН.

У розглянутій конструкції механізм замикання реалізовано у вигляді важільної системи, в якій зусилля пневматичного приводу передається на напівформи під кутом  $\alpha$  до напрямку дії розпірного навантаження (рис. 2.3). Зв'язок між зусиллям приводу  $F_{пр}$  і зусиллям замикання  $F_z$  визначається з урахуванням геометрії важелів:

$$F_{пр} = \frac{F_z}{2 \cdot \sin \alpha}. \quad (2.11)$$

Приймаючи конструктивний кут важелів  $\alpha=3^\circ$ , маємо  $\sin 3^\circ \approx 0,052$ .

Тоді необхідне зусилля, яке повинен розвивати пневматичний привід механізму замикання, становить:

$$F_{пр} = \frac{720}{2 \cdot 0,052} \approx 6923 \text{ кН.}$$

Отримане значення зусилля приводу свідчить про суттєвий вплив геометричних параметрів важільного механізму на рівень навантаження пневматичного приводу механізму замикання прес-форми.

Зменшення кута  $\alpha$  між ланками механізму призводить до різкого зростання необхідного зусилля, яке має розвивати привід, що істотно підвищує силове та енергетичне навантаження на елементи мехатронної системи. Це обґрунтовує доцільність оптимізації кінематичної схеми механізму замикання вже на етапі

проектування, з метою зниження вимог до приводу та підвищення загальної ефективності вузла.

Таким чином, під час розроблення мехатронної системи приводу вузла видуву необхідно забезпечити раціональне поєднання величини робочого тиску стисненого повітря, кількості гнізд у прес-формі, геометрії важільного механізму замикання та характеристик пневматичного приводу, що дозволяє забезпечити стабільну й надійну роботу вузла видуву при мінімально можливих енергетичних витратах і допустимих навантаженнях на конструктивні елементи обладнання [11-15].

## **Висновки до розділу 2**

На основі аналізу принципової електропневматичної схеми керування вузлом видуву визначено структурну організацію системи подачі стисненого повітря, склад і функціональне призначення її основних елементів, а також взаємозв'язок між конструктивними параметрами та динамікою процесу видуву.

Встановлено, що ефективність і стабільність процесу формування ПЕТ-пляшок значною мірою визначаються параметрами пневматичної мережі, зокрема геометрією підвідних трубопроводів, об'ємом проміжного ресивера, характеристиками клапанів високого тиску та конструкцією видувної головки. Проведений аналіз масових витрат повітря в докритичному та критичному режимах витікання дозволив обґрунтувати вплив гідравлічного опору магістралей і внутрішніх об'ємів системи на інтенсивність наростання тиску в порожнині преформи.

За результатами розрахунків показано, що збільшення діаметра трубопроводу між проміжним ресивером і видувною головкою сприяє зменшенню часу заповнення пляшки, проте супроводжується зростанням максимального витратного навантаження на компресорне обладнання. Виявлено також, що збільшення об'єму проміжного ресивера знижує пікові витрати повітря,

однак може призводити до збільшення часу заповнення, що є критичним для високопродуктивних машин. Це підтверджує необхідність компромісного вибору об'єму ресивера з урахуванням продуктивності та енергоефективності системи.

Дослідження впливу діаметра штока розтяжки показало, що зменшення його розмірів підвищує максимальну витрату повітря та погіршує динаміку заповнення пляшки, водночас не впливаючи безпосередньо на процес механічного орієнтованого розтягування преформи. Це дозволяє зробити висновок про доцільність оптимізації геометрії штока розтяжки переважно з позицій газодинамічних характеристик системи видуву.

Розрахунок розпірного зусилля, що діє на механізм замикання прес-форми в режимі основного видуву, показав, що для багатогніздової конфігурації з шістьма гніздами при робочому тиску до 4,0 МПа необхідне мінімальне зусилля замикання становить 600 кН. З урахуванням динамічного характеру процесу, перехідних режимів, пульсацій тиску та інерційності мехатронної системи обґрунтовано доцільність введення коефіцієнта запасу за зусиллям замикання на рівні 15–25 %.

У цілому результати розділу 2 підтверджують, що динаміка процесу видуву ПЕТ-пляшок визначається сукупною дією конструктивних, газодинамічних і керувальних параметрів. Отримані аналітичні залежності та розрахункові дані створюють основу для подальшого експериментального дослідження роботи клапанів високого тиску та оптимізації мехатронної системи приводу вузла видуву, що буде розглянуто в наступних розділах магістерської роботи.

## РОЗДІЛ 3.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ КЛАПАНА ВИСОКОГО ТИСКУ В МЕРЕЖІ ВИДУВУ

#### 3.1. Опис дослідної установки

Для стабілізації системи керування мережею видуву, пропонується замінити клапани 2/2 ( рис.2.1) на клапани 3/2 подвоєні, тобто 2х3/2. Дослідження здійснювались на виробничо-логістичному комплексі компанії КАМОЦЦІ, під час проходження виробничої та переддипломної практики в промисловій лабораторії

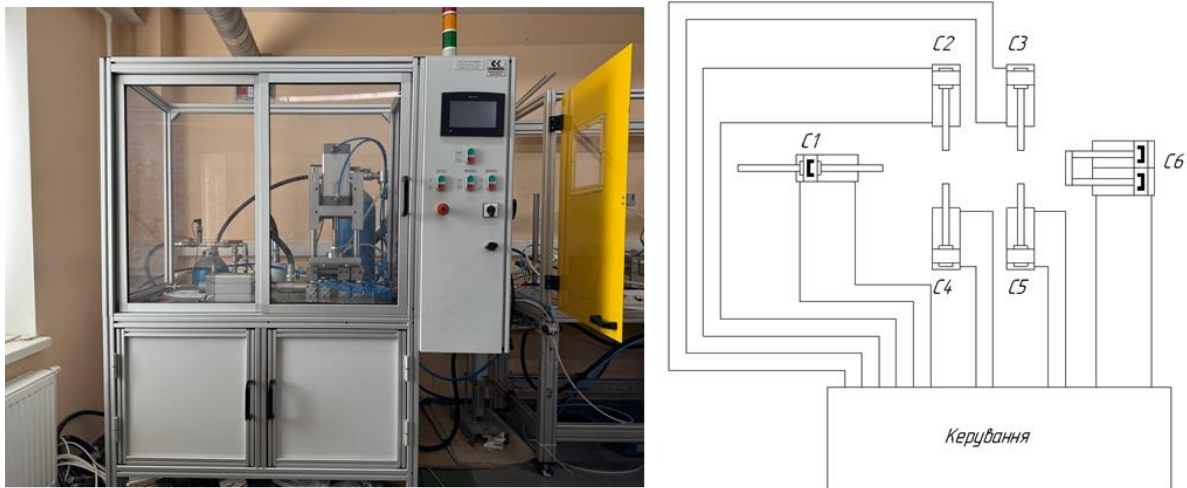


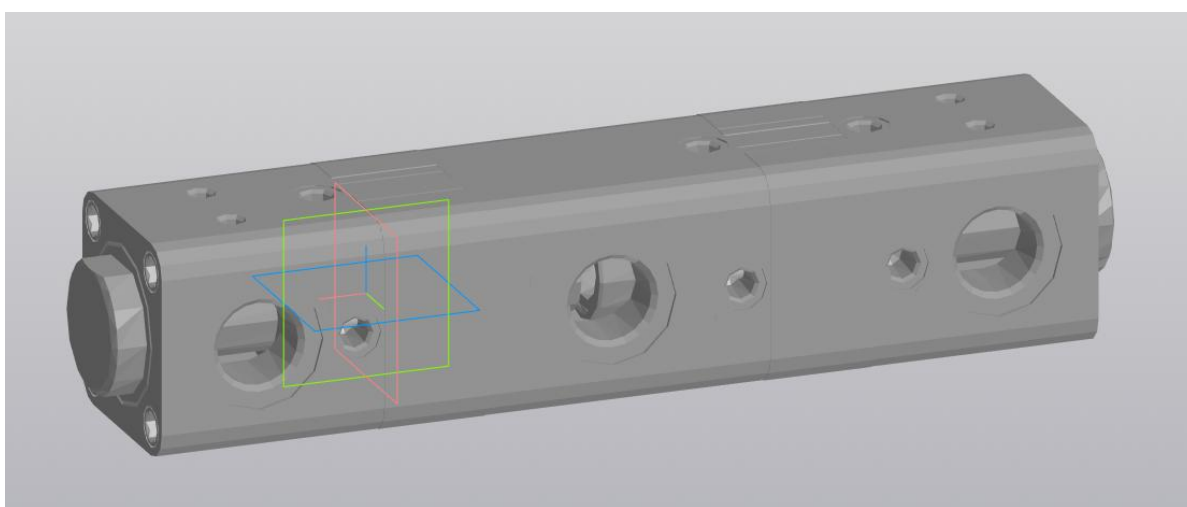
Рис.3.1. Експериментальний стенд і структурна схема пневматичного модуля, призначеного для дослідження динамічних процесів стабілізації тиску в системах видувного формування полімерної тари [1,5].

Для вивчення динамічних процесів стабілізації тиску в пневматичних приводах систем роздуву ПЕТ пляшок реалізовано задачі експериментального дослідження на основі комплексу (рис.3.1), до складу якого входить спеціалізований стенд із шістьма виконавчими пневмоциліндрами та модулем керування (рис. 1). З урахуванням заданих вихідних параметрів зазначений стенд забезпечує відтворення реальних умов функціонування високонапірних клапанів видуву, а також дає змогу здійснювати реєстрацію перехідних процесів тиску в характерних точках

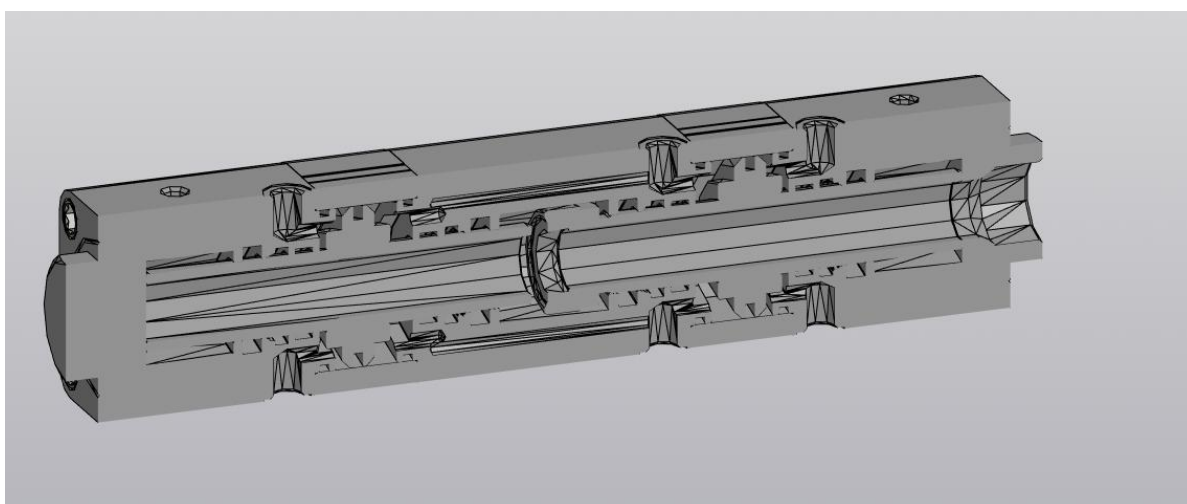
пневматичної системи. Це дозволило отримати експериментальні часові залежності тиску  $p(t)$ , що відображають поведінку стисненого повітря на етапах наростання, стабілізації та контролю тиску.

### 3.2. Опис об'єкта дослідження

Об'єктом дослідження в межах даної магістерської роботи є клапан високого тиску пневматичної мережі видуву ПЕТ-пляшок, який входить до складу мехатронної системи приводу вузла видуву та безпосередньо визначає динаміку подачі й стабілізації стисненого повітря на етапах передвидуву та основного видуву ( рис. 3.2).



а)



б)

Рис.3.2. Загальний 3Д вид дослідного клапана 2x3/2

Як об'єкт експериментального та аналітичного дослідження обрано клапани високого тиску виробництва Camozzi ( схема наведена на рис.3.3.), що широко застосовуються у промислових розтягувально-видувних машинах формування ПЕТ-тари. Зазначені клапани призначені для роботи зі стисненим повітрям під тиском до 40 бар (4,0 МПа) та адаптовані до режимів швидкодіючого циклічного керування, характерних для вузлів видуву багатогніздових машин.

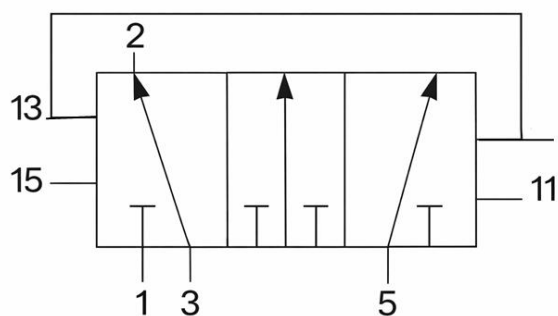


Рис.3.3. Схема клапана 2х3/2

Конструктивно клапан виконаний за коаксіальною схемою, що забезпечує мінімальні гідравлічні втрати, високу пропускну здатність і зменшення мертвих об'ємів у зоні комутації потоків. Корпус клапана виготовлений з анодованого алюмінієвого сплаву, ущільнення — з поліуретану, що забезпечує працездатність у широкому діапазоні температур (від  $-20$  до  $+80$  °С) та високу зносостійкість при роботі в умовах імпульсних навантажень. Номінальний умовний прохід клапана становить 19 мм, що відповідає вимогам високошвидкісної подачі повітря до формуючої порожнини преформи [19].

З функціональної точки зору досліджуваний клапан працює як елемент запірно-регулювальної арматури, що здійснює комутацію потоків між магістраллю високого тиску, лініями передвидуву та основного видуву, а також каналами скидання тиску. Особливістю його роботи є наявність

короткочасних перехідних режимів під час перемикання, пов'язаних з одночасним сполученням окремих портів, що може призводити до імпульсних коливань тиску в пневматичній системі. Саме ці перехідні процеси є критичними з точки зору стабільності процесу формування ПЕТ-пляшки та становлять основний інтерес у даному дослідженні.

У складі експериментального стенда (див. розд. 3.1) клапан високого тиску використовується як керований виконавчий елемент, підключений до пневматичної мережі з ресиверами, дроселями та вимірювальними датчиками тиску. Це дозволяє досліджувати часові залежності тиску  $p(t)$  на вході та виході клапана, оцінювати швидкодію, стабільність перемикання та вплив конструктивних параметрів клапана на динаміку наповнення формуючої порожнини.

Таким чином, клапан високого тиску розглядається не лише як окремий пневматичний елемент, а як ключова ланка мехатронної системи приводу вузла видуву, що поєднує в собі механічні, пневматичні та керуючі функції. Дослідження його динамічних характеристик створює підґрунтя для подальшого обґрунтування параметрів системи керування, вибору оптимальної конфігурації клапанів та підвищення стабільності й енергоефективності процесу видувного формування ПЕТ-пляшок[16].

### **3.3. Результати експериментальних досліджень**

Експериментальні дослідження були спрямовані на виявлення закономірностей стабілізації тиску в пневматичному приводі модуля видуву ПЕТ-тари та оцінку впливу динамічних процесів у високонапірному клапані на роботу всієї системи.

У ході експериментів реєстрація тиску здійснювалась за допомогою датчика PN2092 (рис.3.4), встановленого в характерних точках пневматичної системи. Аналіз отриманих часових залежностей  $p(t)$  проводився окремо для

етапів стабілізації тиску та вимірювання, що дозволило розділити вплив перехідних і квазістаціонарних процесів.



Рис. 3.4. Датчик тиску

Аналіз результатів для пілотних портів (порти 11 і 13), відповідно до результатів на рис.3.5 та в табл.3.1.

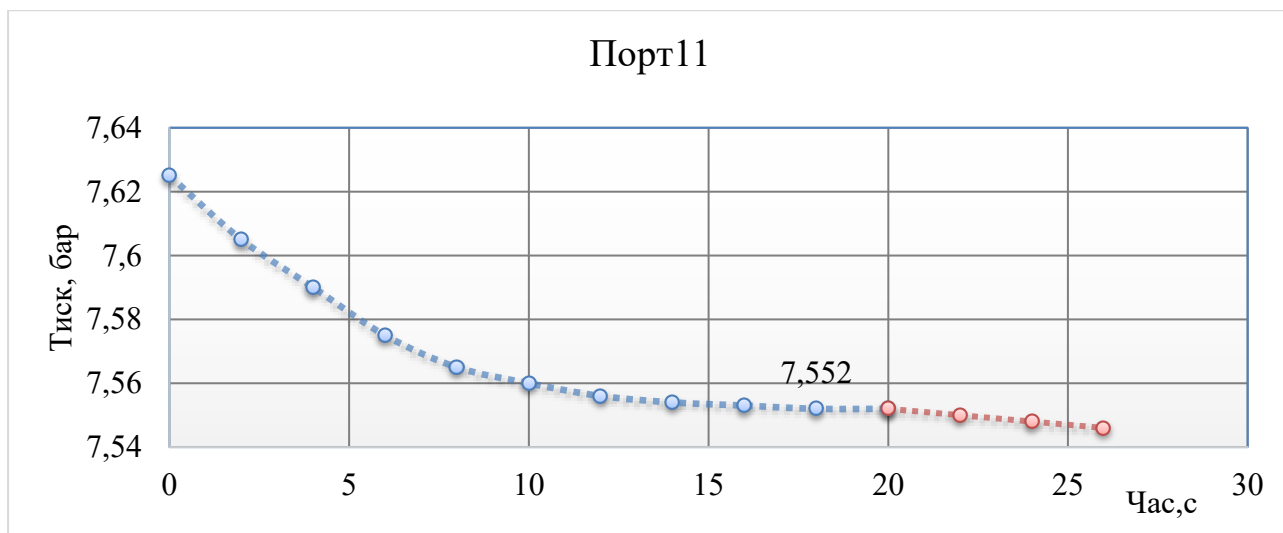


Рис.3.5. Результати вимірювання тиску (порт 11 відповідно до схеми рис.3.3)

На графіку наведено часову залежність тиску в пневматичній системі роздуву для порту 11 (пункт 1.3) у режимах стабілізації та подальшого вимірювання. На етапі стабілізації початкове значення тиску становило 7,603 бар, тоді як усталене значення дорівнює 7,451 бар, що відповідає зменшенню тиску на 152 мбар. За умови допустимого відхилення до 1000 мбар отриманий результат знаходиться в межах нормативних значень і свідчить про коректну роботу системи.

Характер кривої стабілізації має виражений експоненційний спад: після припинення подачі стисненого повітря спостерігається інтенсивне зниження тиску, яке з часом поступово уповільнюється та переходить у квазістаціонарний режим.

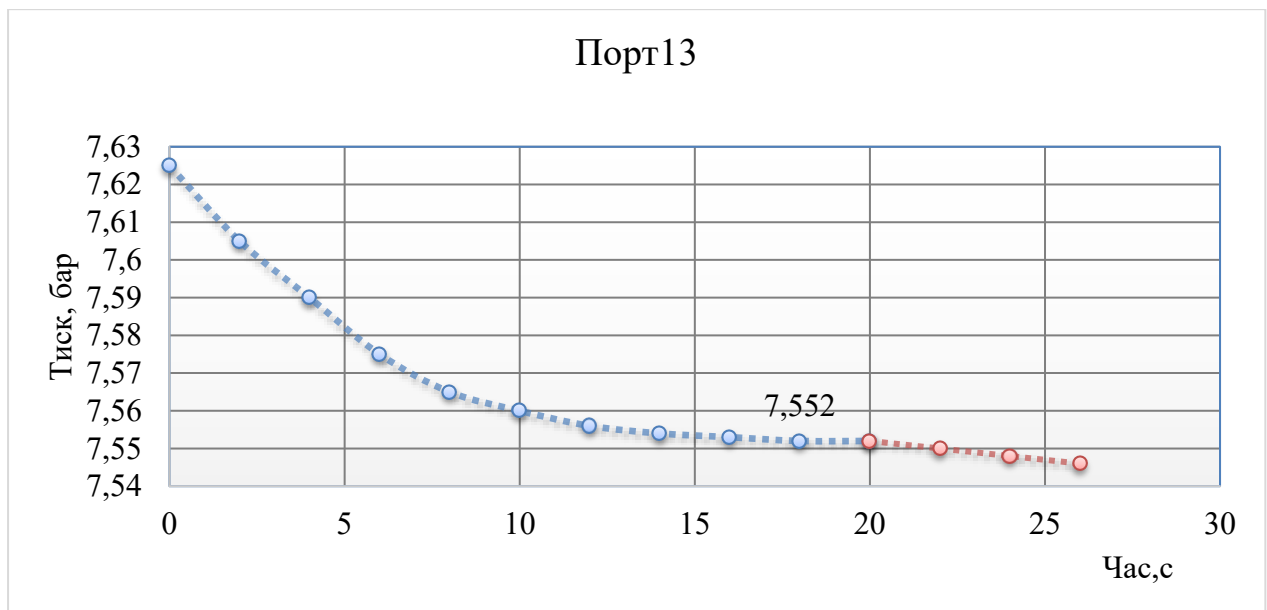


Рис.3.6. Результати вимірювання тиску (порт 13 відповідно до схеми рис.3.3)

Для порту 13 (пункт 1.4) встановлено, що початкове значення тиску на етапі стабілізації становить 7,631 бар, а кінцеве — 7,553 бар, що відповідає загальному зниженню тиску на 78 мбар. За умови допустимого відхилення 1000 мбар отриманий результат повністю відповідає нормативним вимогам. Характер кривої стабілізації має виражений експоненційний вигляд: інтенсивне падіння тиску на початковій ділянці з подальшим плавним

наближенням до усталеного значення, що свідчить про наявність перехідних процесів після припинення подачі стисненого повітря. На етапі вимірювання зафіксовано практично лінійний спад тиску з 7,553 бар до 7,545 бар упродовж 10 с, що відповідає перепаду 8 мбар при допустимому значенні 100 мбар. Таким чином, як процес стабілізації, так і процес вимірювання характеризуються допустимими рівнями коливань тиску, що підтверджує стабільну та надійну роботу пневматичної системи в даній контрольній точці.

Така форма кривої (рис. 3.6) відповідає фізичній природі процесів перерозподілу тиску в пневматичному об'ємі та підтверджує адекватність прийнятої моделі процесу роздуву. У фазі вимірювання фіксується практично лінійна зміна тиску — від 7,451 бар до 7,436 бар протягом 7 с, що відповідає перепаду 15 мбар. При допустимому відхиленні 100 мбар цей результат також відповідає встановленим вимогам та свідчить про стабільність параметрів пневматичної системи в режимі контролю. Таким чином, для порту 11 (пункт 1.3) як процес стабілізації, так і процес вимірювання характеризуються стійкою динамікою та відсутністю перевищення допустимих перепадів тиску, що підтверджує працездатність і надійність системи роздуву на даній ділянці пневматичної мережі.

Для пілотних портів 11 та 13, які працюють у діапазоні до 8 бар, встановлено, що процес стабілізації тиску має чітко виражений експоненційний характер. Після перекриття подачі стисненого повітря спостерігається початкове інтенсивне зниження тиску, яке з часом уповільнюється та виходить на усталений рівень.

Зафіксовані перепади тиску під час стабілізації становили:

- для порту 11 — близько 152 мбар;
- для порту 13 — близько 78 мбар,

Ця істотно менше допустимого відхилення у 1000 мбар. У режимі вимірювання зміна тиску мала майже лінійний характер і не перевищувала 8–

15 мбар, що підтверджує високу герметичність пілотних каналів та стабільність положення золотника клапана.

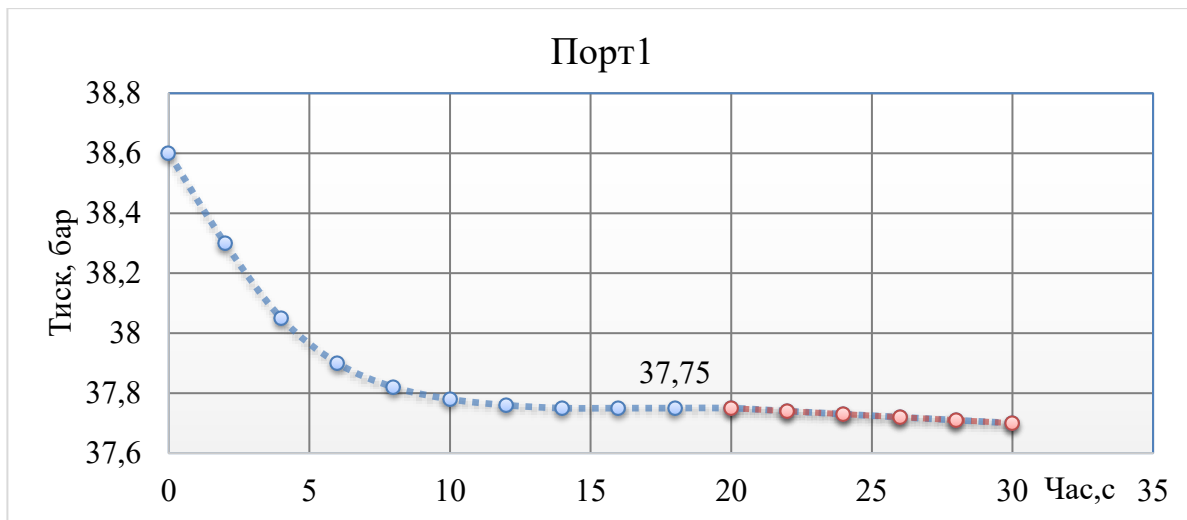


Рис.3.7. Результати вимірювання тиску (порт 1 відповідно до схеми рис.3.3)

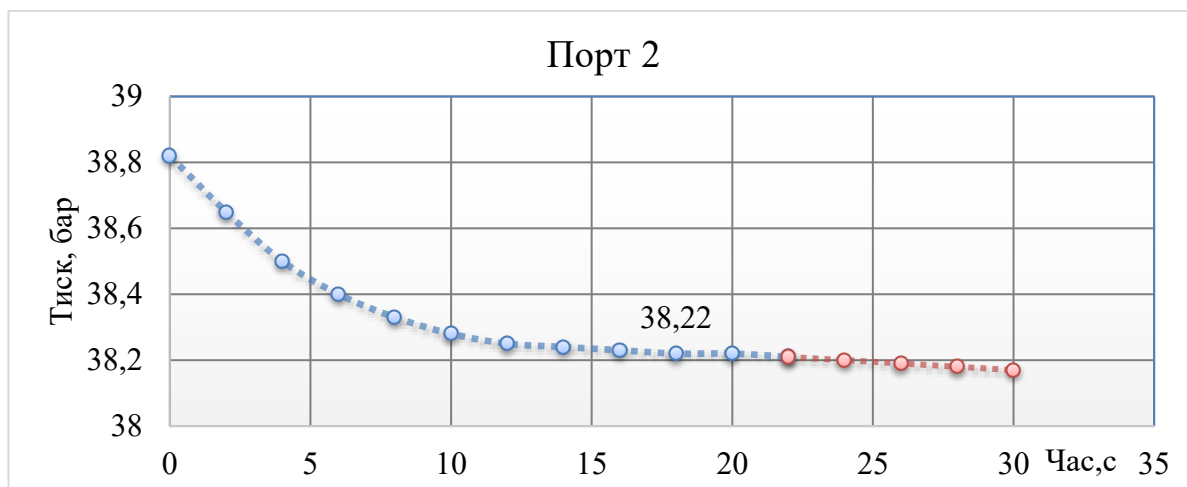


Рис.3.8. Результати вимірювання тиску (порт 2 відповідно до схеми рис.3.3)

Для порту 1 (пункт 1.5) зафіксовано, що на етапі стабілізації початковий тиск становив 38,624 бар, тоді як наприкінці процесу він зменшився до 37,746 бар, що відповідає загальному перепаду 877 мбар. З огляду на допустиме

відхилення, яке для цього режиму становило 4000 мбар, отримане значення перебуває в межах установлених норм.

Під час експериментального аналізу порту 2 (пункт 1.6), на рис.3.8, встановлено, що тиск на етапі стабілізації зменшився з початкового значення 38,822 бар до кінцевого 38,227 бар, що відповідає перепаду 595 мбар. З урахуванням того, що гранично допустиме відхилення для даного режиму становило 4000 мбар, отриманий результат перебуває в межах нормативних вимог.

Характер кривої стабілізації є типовим для пневматичних систем і відображає інтенсивне зниження тиску одразу після припинення подачі з подальшим поступовим вирівнюванням процесу.

У режимі вимірювання зафіксовано зміну тиску з 38,227 бар до 38,189 бар протягом 10 с, що відповідає перепаду 38 мбар. За умови допустимого відхилення 75 мбар це свідчить про стійкий режим роботи та підтверджує надійність функціонування системи на даній ділянці.

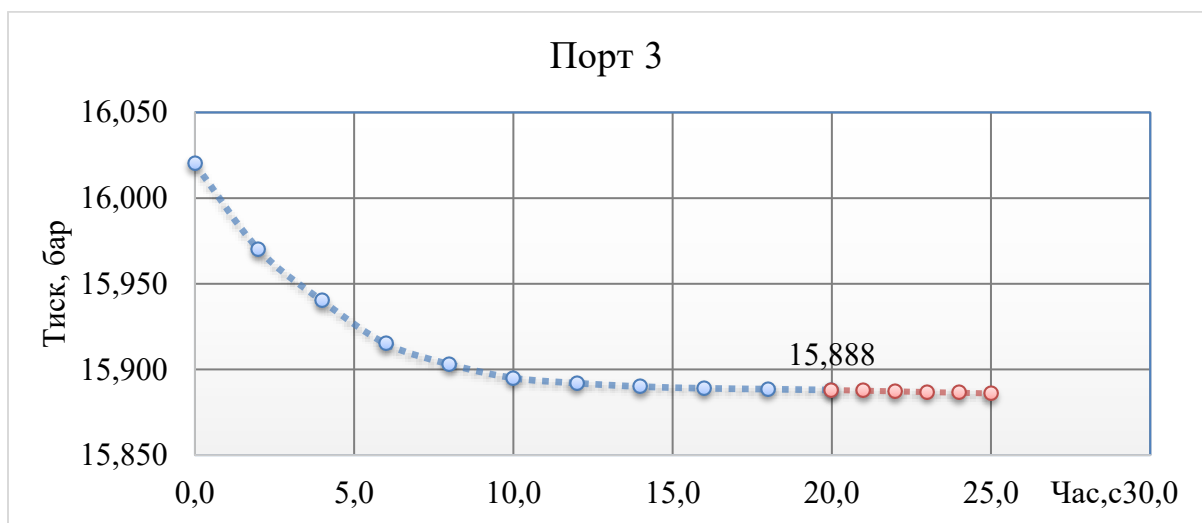


Рис.3.9. Результати вимірювання тиску (порт 3 відповідно до схеми рис.3.3)

Для порту 3 (пункт 1.7) у фазі стабілізації зафіксовано зменшення тиску від початкового значення 16,019 бар до кінцевого 15,884 бар, що відповідає

перепаду 135 мбар. За умови допустимого відхилення на рівні 4000 мбар отриманий результат є цілком прийнятним. Характер кривої стабілізації відповідає типовій експоненційній залежності зі швидшим зниженням тиску на початковому етапі та подальшим його вирівнюванням. У режимі вимірювання тиск протягом 10 секунд зменшився з 15,884 бар до 15,880 бар, тобто всього на 4 мбар, що суттєво нижче допустимого значення 75 мбар і свідчить про високу стабільність роботи системи в даній контрольній точці.

Таблиця 3.1.

Результати експериментального дослідження клапану високого тиску в зоні видуву

Порт	Процес	Початок (бар)	Кінець (бар)	Різниця (мбар)	Допуск (мбар)	Час (с)
Порт11 Пункт 1.3	Стабілізація	7.603	7.451	152.00	1 000.00	20
	Вимірювання	7.451	7.436	15.00	100.00	7
Порт13 Пункт 1.4	Стабілізація	7.631	7.553	78.00	1 000.00	20
	Вимірювання	7.553	7.545	8.00	100.00	10
Порт1 Пункт 1.5	Стабілізація	38.624	37.746	877.00	4 000.00	20
	Вимірювання	37.746	37.716	31.00	75.00	10
Порт2 Пункт 1.6	Стабілізація	38.822	38.227	595.00	4 000.00	20
	Вимірювання	38.227	38.189	38.00	75.00	10
Порт3 Пункт 1.7	Стабілізація	16.019	15.884	135.00	4 000.00	20
	Вимірювання	15.884	15.880	4.00	75.00	10

Крива стабілізації має характерну експоненційну форму з інтенсивним зниженням тиску на початковій ділянці та подальшим поступовим виходом на усталений рівень.

Під час етапу вимірювання спостерігалось зменшення тиску з 37,746 бар до 37,716 бар упродовж 10 с, що відповідає перепаду 31 мбар. За допустимого відхилення 75 мбар даний результат також відповідає нормативним вимогам. Таким чином, робота пневматичної системи в зоні порту 1 характеризується

стабільними та надійними параметрами як у режимі стабілізації, так і в режимі вимірювання.

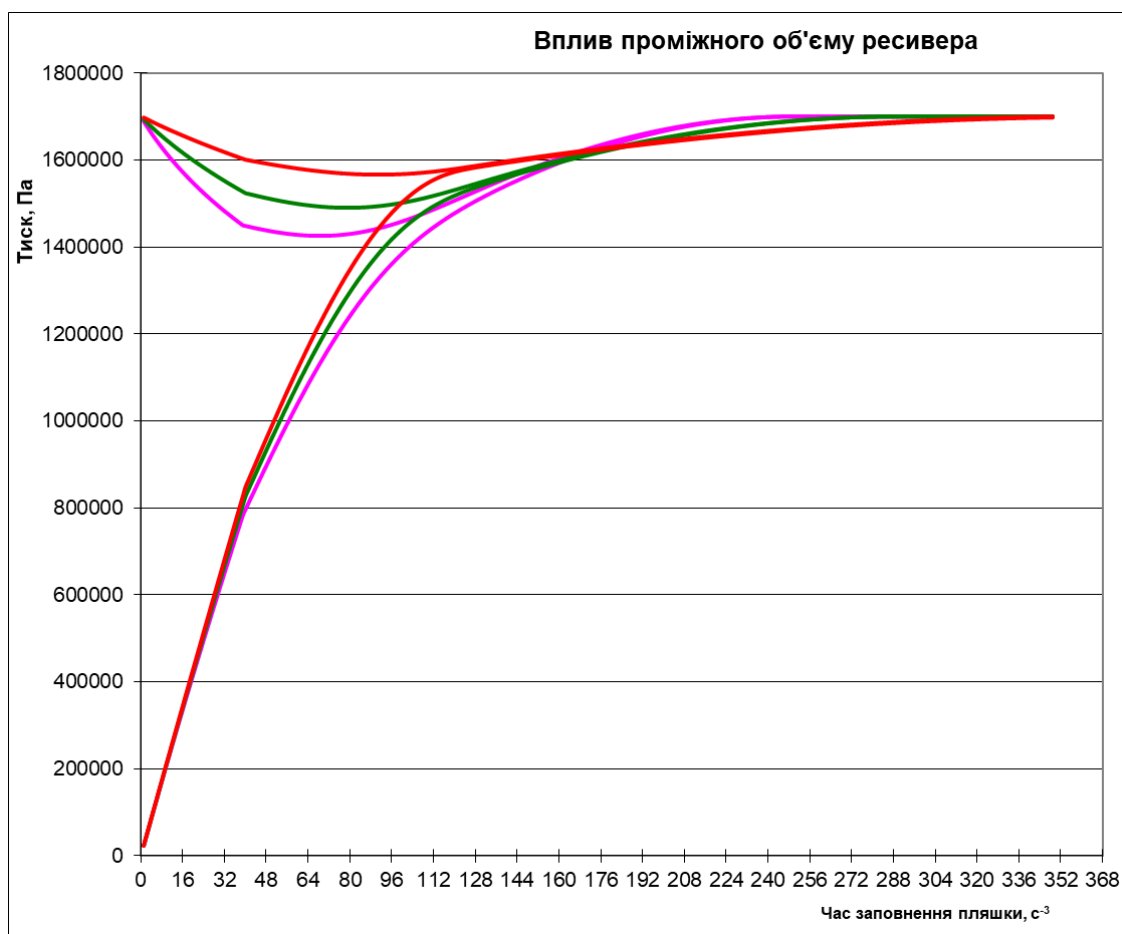


Рис.3.10. Результати дослідження динаміки тиску в системі компресор – проміжний ресивер – видувна головка – пляшка

Графік на рис.3.10 ілюструє результати дослідження динаміки тиску в системі компресор – проміжний ресивер – видувна головка – пляшка та повністю узгоджується з методикою й вихідними даними, наведеними у файлі аналізу роботи машини для видуву ПЕТ-тари .

Зі збільшенням об'єму проміжного ресивера спостерігається зменшення амплітуди провалу тиску на початковій стадії видуву та більш плавний характер його наростання до номінального рівня.

Для малих об'ємів ресивера крива має виражений мінімум, що пояснюється інтенсивним відбором повітря з обмеженого запасу та високою залежністю процесу від миттєвої продуктивності компресора. Зі зростанням

об'єму ресивера система набуває більшої інерційності: тиск стабілізується повільніше, однак максимальні витрати повітря від компресора істотно зменшуються, що підтверджує енергетичну доцільність застосування ресиверів середнього об'єму (5–10 л). Таким чином, графік підтверджує компромісний характер вибору об'єму проміжного ресивера між швидкістю процесу видуву та зниженням пікових навантажень на компресор і пневматичну мережу, що є принципово важливим для стабільної роботи промислових ПЕТ-видувних машин.

### **Висновки до розділу 3**

Результати виконаних експериментальних досліджень засвідчили, що процеси стабілізації та подальшого вимірювання тиску в приводі пневматичного модуля вузла видуву мають чітко виражений закономірний характер і узгоджуються з фізичною сутністю перехідних процесів, притаманних пневматичним системам.

На етапі стабілізації в усіх контрольних точках зафіксовано експоненційний характер зниження тиску: безпосередньо після припинення подачі стисненого повітря спостерігається інтенсивний спад, який із плином часу поступово сповільнюється та виходить на усталений рівень. Найбільші значення перепадів тиску виявлено в портах із високим початковим тиском (порти 1 та 2 — понад 500–800 мбар), тоді як у портах із нижчим робочим тиском (порти 11, 13 та 3) зниження тиску становило лише 78–152 мбар. В усіх досліджених випадках перепади тиску не перевищували допустимих значень (1000–4000 мбар), що свідчить про відсутність критичних витоків і підтверджує стабільну роботу пневматичної системи.

Під час режиму вимірювання зміна тиску набувала близького до лінійного характеру, що вказує на стабілізацію режиму після завершення перехідних процесів. Зафіксовані перепади тиску в цьому режимі були незначними й коливалися в межах від 4 мбар (порт 3) до 38 мбар (порт 2), що відповідає лише

5–50 % від допустимого рівня. Це дозволяє вважати втрати тиску в інтервалі вимірювання мінімальними.

Суттєвим є також те, що навіть для портів із підвищеним початковим тиском (порти 1 та 2), де під час стабілізації спостерігалися найбільші перепади, у подальшому режимі вимірювання були зафіксовані незначні втрати тиску (31–38 мбар). Це додатково підтверджує достатній рівень герметичності та надійності пневматичної системи приводу вузла видуву.

## РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### **4.1. Вимоги з охорони праці та безпечної експлуатації обладнання ПЕТ-видуву**

#### **4.1.1. Підготовка персоналу до роботи**

Перед початком роботи оператор зобов'язаний одягнути справний спеціальний одяг, призначений для роботи на обладнанні харчової промисловості. Спецодяг має бути повністю застібнутий на всі гудзики або зав'язки, без звисаючих кінців, що можуть потрапити в рухомі частини машин ПЕТ-видуву (механізми замикання форм, каретки, тягові та важільні системи).

Забороняється:

1. заколювати одяг шпильками, голками або іншими сторонніми предметами;
2. зберігати в кишенях гострі, колючі або крихкі предмети;
3. працювати в одязі з пошкодженнями, розривами або вільними елементами.

Особлива увага приділяється використанню засобів індивідуального захисту (захисні окуляри, рукавиці, взуття з неслизькою підошвою), оскільки обладнання ПЕТ-видуву працює з високим тиском стисненого повітря та підвищеними температурами нагріву преформ.

#### **4.1.2. Підготовка робочої зони**

Перед запуском обладнання оператор повинен організувати робоче місце таким чином, щоб забезпечити безпечні та зручні умови праці:

1. забезпечити вільні проходи та доступ до пультів керування, аварійних кнопок і зон обслуговування;

2. перевірити стійкість виробничих столів, стелажів, а також надійність кріплення машин ПЕТ-видуву, компресорного та пневматичного обладнання до фундаментів і опор;
3. надійно закріпити пересувне або переносне обладнання, інструмент та допоміжний інвентар на робочих поверхнях, візках або підставках;
4. раціонально розмістити заготовки (ПЕТ-преформи), готову тару, інструменти та пристосування відповідно до частоти їх використання, з урахуванням санітарних вимог харчового виробництва.

#### **4.1.3. Огляд обладнання перед початком роботи**

Перед увімкненням установки необхідно виконати зовнішній огляд обладнання та перевірити:

1. достатність і рівномірність освітлення робочої зони;
2. відсутність оголених або пошкоджених електричних проводів;
3. надійність закриття струмоведучих, пускових і комутаційних елементів;
4. справність заземлювальних з'єднань та відсутність обривів контактів між металевими неструмоведучими частинами обладнання;
5. наявність і надійність огорожень, захисних кожухів та екранів рухомих механізмів (замикання прес-форми, механізмів розтягування преформи, кареток);
6. відсутність сторонніх предметів усередині машини та в зоні дії форм;
7. справність приладів контролю, регулювання та автоматики (манометрів, датчиків тиску, температури, запобіжних клапанів), наявність пломб, справність шкал і цілісність захисного скла;
8. відсутність механічних пошкоджень трубопроводів високого тиску, тріщин, корозії, дефектів зварних швів, витоків у клампових та різьбових з'єднаннях пневматичної системи видуву;
9. стан підлог (відсутність ковзких ділянок, рідин, забруднень або вибоїн).

## **4.2. Стан інвентарю та допоміжних засобів**

Оператор повинен переконатися у справності використовуваного інструменту та інвентарю:

1. поверхні тари, ручки лопаток, совків і допоміжних пристроїв мають бути чистими, гладкими, без тріщин і гострих кромок;
2. рукоятки ножів повинні бути щільно закріплені, неслизькі та ергономічні, з упором для пальців;
3. леза ножів — гладкі, відполіровані, без вм'ятин і тріщин.

Перед початком робіт необхідно перевірити справність підйомних платформ, гідравлічних візків з підйомними вилами та іншого транспортного обладнання, що використовується для переміщення преформ, прес-форм або допоміжних вузлів.

Усі виявлені під час огляду порушення, несправності або відхилення від нормальної роботи обладнання ПЕТ-видуву повинні бути негайно доведені до відома безпосереднього керівника або відповідальної особи. До повного усунення недоліків запуск і експлуатація обладнання категорично забороняються.

## **4.3. Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях при роботі з гідравлічним або пневматичним тиском**

У процесі виконання робіт необхідно постійно контролювати стан обладнання та виробничого середовища з метою недопущення аварійних ситуацій, ознаками яких можуть бути загоряння або пожежі під час електро- чи газозварювальних робіт поблизу легкозаймистих матеріалів, загазованість приміщення (поява сторонніх запахів, різь в очах, запаморочення, погіршення самопочуття), раптове знеструмлення внаслідок пошкодження кабелів або заземлення, поява нетипових звуків проходження електричного струму в корпусі обладнання, мимовільна зупинка або поломка машин, а також падіння вантажів чи удари рухомих предметів. У разі виникнення пожежі працівник зобов'язаний негайно вжити заходів щодо її ліквідації на початковій стадії із

застосуванням первинних засобів пожежогасіння (вогнегасників, внутрішніх пожежних кранів, води, піску, стаціонарних систем), а якщо самотійне гасіння неможливе — терміново повідомити пожежну охорону, вказавши місце та можливу причину займання, наявність людей у небезпечній зоні та свої анкетні дані, проінформувати чергового або керівника робіт, організувати евакуацію персоналу, локалізацію осередку пожежі та зустріч пожежно-рятувальних підрозділів.

При появі стороннього запаху, різі в очах, погіршення свідомості слід виявити, чи працює приточно-витяжна вентиляція та при її непрацездатності прийняти міри по ліквідації пошкоджень.

У випадках неможливості відновлення роботи вентиляції слід припинити роботу, довести до відома керівника ті діяти відповідно з його вказівками.

При виявленні високої загазованості приміщень слід вивести з приміщень людей, надати потерпілим першу медичну допомогу та викликати швидку допомогу. Сповістити про це керівника та покинути приміщення у відповідності зі схемою евакуації.

При раптовому вимкненню електроенергії та електроосвітлення неможна пересуватися в темряві до включення аварійного або основного освітлення. Після вимкнення аварійного освітлення слід виявити причину порушення (обрив проводів живлення, несправності заземлення та інші пошкодження), довести до відома керівника робіт. При несправності електроустаткування не можна самотійно усувати несправність. Необхідно викликати електроналогоджувальника.

При поломці чи мимовільній зупинці устаткування робітник повинен вимкнути устаткування, припинити роботу, повідомити керівника та діяти відповідно до його вказівок.

При виході з ладу контрольно-вимірювальних приладів, засобів автоматичних блокувальних пристроїв та припиненні роботи, необхідно відключити устаткування і викликати наладчика з засобів автоматики. Про це необхідно сповістити керівника.

При розриві трубопроводів чи шлангів гідравліки, стиснутого повітря, систем пари, необхідно припинити подачу гідравлічного штатної арматури, повідомити про аварію керівника та приступити до ліквідації аварії.

Випробування повинні бути припинені, трубопроводи перекриті, а випускні клапани (вентилі) відкриті та надлишковий тиск повинен бути відсутній:

- порушення герметичності випробовування виробу;
- виникнення пожежі;
- перерви подачі води або повітря;
- відключення електроенергії;
- відмовлення манометрів чи других приладів, коли запірній пристрій на трубопроводі з надлишковим тиском чи гідравлічним тиском знаходиться в положенні «Відкрито» та середовище подається у виріб, пристрій;
- зростання тиску вище дозволеного, незважаючи на дотримання усіх вимог, зазначеним в інструкції з обслуговування установки.

Усунення несправності варто робити з дозволу керівника після скидання тиску.

## ВИСНОВОК

За результатами розроблення кваліфікаційної роботи на тему «Дослідження мехатронної системи приводу вузла видуву обладнання для формування ПЕТ-пляшок» комплексно вирішено науково-прикладне завдання, пов'язане з аналізом, моделюванням та експериментальним дослідженням роботи пневматичної мехатронної системи приводу вузла видуву сучасного обладнання для формування ПЕТ-тари.

Вдповідно до сформованих задач дипломної роботи отримані такі результати:

1. У процесі виконання роботи проведено ґрунтовний аналіз технологічного процесу розтягувально-видувного формування ПЕТ-пляшок, конструктивних особливостей вузлів видуву та сучасних систем керування пневматичними приводами. Показано, що стабільність геометричних і міцнісних характеристик готової тари значною мірою визначається динамікою подачі та стабілізації стисненого повітря, а також узгодженістю роботи пневматичних, механічних і керувальних підсистем.
2. У розрахунково-аналітичній частині обґрунтовано вибір структури пневматичної системи вузла видуву, визначено основні конструктивні та режимні параметри, досліджено вплив діаметра трубопроводів, об'єму проміжного ресивера та геометрії видувної головки на динаміку заповнення пляшки і енерговитрати системи. Отримані результати дозволили встановити раціональні співвідношення між швидкістю процесу видуву та навантаженням на компресорне обладнання, що є важливим з точки зору енергоефективності промислових ліній.
3. Експериментальні дослідження роботи клапана високого тиску в мережі видуву підтвердили закономірний характер перехідних процесів у пневматичній системі. Встановлено, що процеси стабілізації та вимірювання тиску відповідають фізичній природі газодинамічних явищ і не виходять за допустимі межі, що свідчить про герметичність,

надійність і працездатність досліджуваної мехатронної системи приводу вузла видуву.

4. У розділі з охорони праці розглянуто вимоги безпеки під час експлуатації обладнання з пневматичним і гідравлічним тиском на підприємствах харчової промисловості, а також визначено основні заходи щодо запобігання аварійним ситуаціям, що підтверджує практичну спрямованість роботи та відповідність вимогам нормативної документації.
5. Окремі результати роботи висвітлені в друкованих працях ( Додаток Б).

Отримані в роботі результати мають практичну цінність і можуть бути використані при проектуванні, налаштуванні та модернізації вузлів видуву ПЕТ-машин.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Aoki Technical Laboratory, Inc. Injection Stretch Blow Molding Machines : product catalogue. – Tokyo, Japan, 2022. – Режим доступу: [https://www.aokitech.co.jp/en/products-services\\_top](https://www.aokitech.co.jp/en/products-services_top)
2. Armstrong, C. G. Measuring and modelling air mass flow rate in the injection stretch blow moulding process / C. G. Armstrong, G. H. Menary, Y. Salomeia, J. Nixon, S. Yan // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2015. – Режим доступу: [https://pureadmin.qub.ac.uk/ws/files/15653691/Journal\\_paper\\_mass\\_flow\\_rate\\_post\\_review\\_mark\\_up.pdf](https://pureadmin.qub.ac.uk/ws/files/15653691/Journal_paper_mass_flow_rate_post_review_mark_up.pdf)
3. Arlington Machinery. AOKI SBIII Injection Stretch Blow Molding Machine : technical description. – USA, 2021. – Режим доступу: <https://www.arlingtonmachinery.com/product-detail/21294/aoki-injection-stretch-blow-molding-machine-model/>
4. Emerson Electric Co. AVENTICS™ High Pressure Pneumatic Valves : catalogue. – USA, 2020. – Режим доступу: <https://www.emerson.com/documents/automation/catalog-stretching-cylinder-units-control-valves-aventics-en-7553548.pdf>
5. Gavva, O. M. Пакувальне обладнання / О. М. Гавва, А. П. Беспалько, А. І. Волчко. – Київ : ІАЦ «Упаковка», 2008. – 435 с. – Режим доступу: <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/18197>
6. Gavva, O. M. Пакувальне обладнання : підручник для студентів ВНЗ / О. М. Гавва, А. П. Беспалько, А. І. Волчко, О. О. Кохан. – Київ : ІАЦ «Упаковка», 2010. – 744 с. – Режим доступу: <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/18197>
7. Hopmann, C. Stage Stretch-Blow Molding Process / C. Hopmann // *AIP Conference Proceedings*. – 2015. – Режим доступу: [https://pubs.aip.org/aip/acp/article-pdf/doi/10.1063/1.4918415/12969343/050011\\_1\\_online.pdf](https://pubs.aip.org/aip/acp/article-pdf/doi/10.1063/1.4918415/12969343/050011_1_online.pdf)

8. Husky Injection Molding Systems. PET systems solutions : brochure. – Canada, 2019. – Режим доступу: [https://www.husky.co/siteassets/documents/rp\\_petsystems\\_general\\_2019.pdf](https://www.husky.co/siteassets/documents/rp_petsystems_general_2019.pdf)
9. Husky Injection Molding Systems. HyPET preform systems : technical overview. – Canada, 2020. – Режим доступу: <https://pdf.directindustry.com/pdf/husky-injection-molding-systems/hypet-preform-systems/20397-309845.html>
10. ISO. ISO 8573-1:2010 Compressed air – Contaminants and purity classes. – Geneva, 2010. – Режим доступу: <https://towcompressor.ir/wp-content/uploads/2019/09/ISO-8573-1.pdf>
11. KHS GmbH. InnoPET Blomax Series IV : stretch blow moulding machines. – Germany, 2017. – Режим доступу: [https://www.khs.com/fileadmin/user\\_upload/Datenblatt\\_BlomaxIV-240317\\_EN.pdf](https://www.khs.com/fileadmin/user_upload/Datenblatt_BlomaxIV-240317_EN.pdf)
12. KHS GmbH. InnoPET Blomax Series : technical brochure. – Germany, 2018. – Режим доступу: <https://pdf.directindustry.com/pdf/khs-gmbh/innopet-blomax-series-iv-stretch-blow-molder/21322-247471.html>
13. Kodra, Yu. V. Технологічні машини. Розрахунок і конструювання : підручник / Ю. В. Кодра, З. А. Стоцька. – Львів : Львівська політехніка, 2004. – 468 с. – Режим доступу: <https://opac.kntu.kr.ua/bib/5348>
14. Krones AG. Contiform high-performance blow moulder : product description. – Germany, 2021. – Режим доступу: <https://www.krones.com/en/products/machines/high-performance-blow-moulder-contiform.php>
15. Krones AG. Contiform S/H : stretch blow moulding systems. – Germany, 2020. – Режим доступу: [https://www.jade.fi/site/assets/files/1456/krones\\_contiform\\_sh\\_blow\\_moulder\\_brochure.pdf](https://www.jade.fi/site/assets/files/1456/krones_contiform_sh_blow_moulder_brochure.pdf)

16. Krones AG. Contiform Bloc BL : integrated blowing systems. – Germany, 2022. – Режим доступа: [https://making.com/wp-content/uploads/2024/09/Krones\\_6100\\_brochure.pdf](https://making.com/wp-content/uploads/2024/09/Krones_6100_brochure.pdf)
17. Menary, G. H. Modelling of Injection Stretch Blow Moulding of PET Containers / G. H. Menary et al. // *Polymer Engineering & Science*. – 2014. – Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/225149160>
18. MHT Mold & Hotrunner Technology AG. PET preform moulds : catalogue. – Switzerland, 2016. – Режим доступа: [https://www.mht-ag.com/fileadmin/user\\_upload/MHT\\_Broschu\\_re\\_PET\\_2016\\_A4\\_eng\\_web.pdf](https://www.mht-ag.com/fileadmin/user_upload/MHT_Broschu_re_PET_2016_A4_eng_web.pdf)
19. Nissei ASB Machine Co., Ltd. ASB-12M injection stretch blow moulding machine : catalogue. – Japan, 2013. – Режим доступа: [https://www.nisseiasb.co.jp/en/products/catalogs/pdf/asb12m\\_201307\\_en.pdf](https://www.nisseiasb.co.jp/en/products/catalogs/pdf/asb12m_201307_en.pdf)
20. Nissei ASB Machine Co., Ltd. ASB-70DPH / ASB-70DPW : technical catalogue. – Japan, 2012. – Режим доступа: [https://www.nisseiasb.co.jp/en/products/catalogs/pdf/asb70dph-asb70dpw\\_201206\\_en.pdf](https://www.nisseiasb.co.jp/en/products/catalogs/pdf/asb70dph-asb70dpw_201206_en.pdf)
21. Parker Hannifin. Compressed air purity and quality testing. – USA, 2019. – Режим доступа: <https://www.parker.com/content/dam/Parker.com/Literature/Hiross-Zander-Division/PDF-Files/PIS/WPCAQT-00-EN.pdf>
22. Parker Hannifin. Introduction to ISO air quality standards. – USA, 2020. – Режим доступа: <https://www.kompresory-info.sk/files/pdf/parker/iso-air-quality-standards.pdf>
23. Queen's University Belfast. Measuring and modelling air mass flow rate in ISBM process. – UK, 2015. – Режим доступа: [https://pure.qub.ac.uk/ws/files/15653691/Journal\\_paper\\_mass\\_flow\\_rate\\_post\\_review\\_mark\\_up.pdf](https://pure.qub.ac.uk/ws/files/15653691/Journal_paper_mass_flow_rate_post_review_mark_up.pdf)

24. Sacmi Group. SBF rotary stretch blow moulding machines. – Italy, 2021.  
– Режим доступу: <https://sacmi.com/en-US/packaging/news/5748/New-Sacmi-stretch-blow-moulding-machines-ideal-partners-for-every-bottling-line>
25. Sidel Group. EvoBLOW Regular : blow moulding systems. – France, 2022.  
– Режим доступу: <https://www.sidel.com/machines-repository/sidel-evoblow-regular/>
26. SIPA S.p.A. SFL linear blow moulding systems. – Italy, 2020. – Режим доступу: <https://sipasolutions.com/hubfs/65377e3439085907221863.pdf>
27. SIPA S.p.A. Linear blowing systems SFL. – Italy, 2021. – Режим доступу: <https://pdf.directindustry.com/pdf/sipa/sfl-linear-blowing-systems/51370-648070.html>
28. SIPA S.p.A. SFL-1XL for large PET containers. – Italy, 2019. – Режим доступу: <https://neofyton.com/wp-content/uploads/2019/10/Sistemi-za-proizvodnju-PET-plasticnih-flasa-model-SFL-1XL-for-large-sizes.pdf>
29. Соколенко, А. І. Справочник механика пищевой промышленности / А. І. Соколенко, А. І. Українець, В. Л. Яровой та ін. – Київ : АртЕк, 2004.  
– 304 с. – Режим доступу: [https://elibrary.nuft.edu.ua/library/TopicDescription?page=3&topic\\_id=14312](https://elibrary.nuft.edu.ua/library/TopicDescription?page=3&topic_id=14312)
30. Trujillo, J. A. Air recovery assessment on high-pressure pneumatic circuit used in stretch blow moulding machines. – Spain, 2016. – Режим доступу: <https://upcommons.upc.edu/bitstreams/7bb52d5e-3aed-4b67-87a5-4a411fd2e99f/download>

**Технічні характеристики:**

1. Електропневматичний клапан високого тиску, 2 × 3/2
2. Номінальний робочий тиск до 4,0 МПа.
3. Тиск керування 8 ... 10 бар.
4. Номінальний діаметр проходу (умовний прохід)  $D_n = 30$  мм.
5. корпус — анодований алюмінієвий сплав; С
6. ущільнення — поліуретан (PUR) / NBR;
7. золотник — нержавіюча сталь
8. Маса клапана — 6,8 кг.

**КР-КЛАПАН ВТ**

МА. ПЕР. НА БОДУМ. ПІСЛ. ЗМІН	Л. П. М.	М. В. С. С.	М. З. П. А. Р.
ВЕРСІЯ ДО ВЕРСІЙ М		0	1:2
Ч. К. С. К. Т. У. П. Р. С. Б.	Л. П. М.	Л. П. С. В. Т.	
Т. А. С. П. Р.			
С. П. А. Р. С. С. В. П. Е.			

**КР-КЛАПАН ВТ**

Сталь 10 ГОСТ 1050-2013	
-------------------------	--

Б. С. М. М. А. 3