

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ
КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЇ ГІДРОАЕРОМЕХАНІКИ І МЕХАНОТРОНІКИ

«На правах рукопису»
УДК 631.171; 004.8

До захисту допущено:

Завідувач кафедри ПГМ
_____ Олег ЛЕВЧЕНКО

“ ____ ” _____ 2025 р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою «Автоматизовані та роботизовані
механічні системи»
за спеціальності 131 Прикладна механіка

на тему: Смарт-система поливу та зрошування для теплиці з 40 денним циклом вирощування городини.

Виконав (-ла): студент (-ка) 2 курсу, групи МА-41мп

Гульков Кирило Станіславович
(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник доц., к.т.н., Муращенко Альона Миколаївна
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент доц. кафедри ТВЛА, к.т.н. Борис Р.С.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2025 рік

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут
Кафедра прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 131 Прикладна механіка

Освітньо-професійна програма «Автоматизовані та роботизовані механічні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ПГМ

_____ Олег ЛЕВЧЕНКО
(підпис)

“ _____ ” _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

Гулькову Кирилу Станіславовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема дисертації: Смарт-система поливу та зрошування для теплиці з 40 денним циклом вирощування городини.

Науковий керівник дисертації: Муращенко Альона Миколаївна к.т.н., доцент

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

затверджена наказом по університету від “6” листопада 2025 року №4844

2. Термін подання студентом дисертації: 12 грудня 2025р.

3. Об'єкт дослідження: теплиця малих габаритів

4. Вихідні дані: нормативно-правові джерела щодо охорони, захисту та управління інтелектуальною власністю, наукові статті, наукові джерела з питань автоматизованих та механічних систем, габаритні розміри теплиці (4000x7000x1750), діаметр трубопроводів.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов’язкових креслень, плакатів, презентацій тощо)

5 креслень формату А1 (перший лист – схема гідравлічна принципова, другий лист –схема електрогідравлічна принципова, третій лист – складальне креслення форсунки, четвертий лист – деталювання, п’ятий лист – технологія виготовлення деталі «Пістон»), презентація.

6. Орієнтовний перелік перелік графічного (ілюстративного) матеріалу 68 рисунків, 20 таблиць, 5 листів А1.

7. Орієнтовний перелік публікацій - одна публікація :Синицина Єлизавета, Кирило Гульков, Олександр Губарев. "Дослідження спрощеної моделі форсунки для забезпечення вологості в тепличному об’єкті." *Матеріали конференцій МЦНД* 18.10. 2024; Вінниця, Україна (2024): 196-202.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів дисертації	Примітка
1	Отримання завдання до магістерської дисертації	01.10.2025	Виконав
2	Розробка дисертації	01.10.2025 – 07.10.2025	Виконав
3	Робота над дисертації та виконання креслень	08.10.2025 – 25.11.2025	Виконав
4	Оформлення магістерської дисертації	26.11.2025 – 29.11.2025	Виконав
5	Доопрацювання дисертації	02.12.2025 – 14.12.2025	Виконав
6	Захист магістерської дисертації	22.12.2025 – 23.12.25	

Студент

Кирило ГУЛЬКОВ

Керівник

Альона МУРАЩЕНКО

Пояснювальна записка до магістерської дисертації

на тему: Смарт-система поливу та зрошування для теплиці з 40 денним циклом вирощування городини

Київ – 2025 рік

АНОТАЦІЯ

Головною метою магістерської дисертації є розроблення інтегрованої смарт-системи краплинного поливу та зволоження повітря для тепличних комплексів. На початковому етапі проведено аналіз існуючих рішень і систем автоматизації, що дозволило сформулювати технічні вимоги та критерії ефективності роботи майбутнього комплексу. У ході дослідження опрацьовано спеціалізовану літературу з гідравліки та автоматизації, на основі якої раціонально підібрано всі необхідні компоненти системи. Розроблено гідравлічні та електричні схеми, виконано інженерні розрахунки для трубопроводів, насосного обладнання, арматури, датчиків, виконавчих пристроїв та контролерів. Особливу увагу приділено системі зволоження повітря, що вимагає високої точності розрахунків. Визначено потрібну кількість форсунок, розраховано витрату води, робочі параметри та інші граничні умови, необхідні для формування стабільного дрібнодисперсного туману. У SolidWorks створено тривимірну модель форсунки та виконано симуляції внутрішньої течії, аналіз напружено-деформованого стану та оптимізацію геометрії. У ANSYS Fluent проведено CFD-моделювання й моделювання розпилення методом DPM для оцінки характеристик туманоутворення. Для автоматизації роботи розроблено електричну схему керування у FluidSim Hydraulics та створено алгоритми управління на базі програмованого логічного контролера. Підсумком дослідження є комплексний проєкт смарт-системи поливу та зволоження повітря, що охоплює гідравлічні, електричні, конструкторські, технологічні та програмні рішення. Отримані результати підтверджують ефективність та практичну придатність розробленої системи для використання в умовах промислової теплиці.

Ключові слова: гідравлічна система, теплиця, система зволоження повітря, система краплинного поливу, форсунка.

ABSTRACT

The main goal of this master's thesis is the development of an integrated smart system for drip irrigation and air humidification in greenhouse complexes. At the initial stage, an analysis of existing solutions and automation systems was conducted, which made it possible to formulate technical requirements and efficiency criteria for the future system. During the research, specialized literature on hydraulics and automation was studied, which enabled the rational selection of all necessary system components. Hydraulic and electrical schemes were developed, and engineering calculations were carried out for pipelines, pumping equipment, fittings, sensors, actuators, and controllers. Special attention was given to the air humidification subsystem, which requires high precision in engineering calculations. The required number of nozzles was determined, as well as the water flow rate, operating parameters, and other boundary conditions necessary for generating a stable fine-dispersed mist. A 3D nozzle model was created in SolidWorks, followed by simulations of internal fluid flow, stress-strain analysis, and optimization of the spray channel geometry. In ANSYS Fluent, CFD simulations and DPM spray modeling were performed to evaluate mist formation characteristics. To ensure automated operation of the system, an electrical control circuit was developed in FluidSim Hydraulics, and control algorithms were created based on a programmable logic controller. The result of the study is a comprehensive smart system for irrigation and air humidification, integrating hydraulic, electrical, structural, technological, and software components. The obtained results confirm the efficiency and practical applicability of the system for use in industrial greenhouse conditions.

Keywords: hydraulic system, greenhouse, air humidification system, drip irrigation system, nozzle.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ.....	11
1.1 Автоматизація: поняття, завдання, елементи та застосування	11
1.1.1 Що таке автоматизація	11
1.1.2 Області застосування автоматизації.....	12
1.1.3 Елементи гідравлічної автоматизації	13
1.1.4 Типи автоматизації (за рівнем та за способом управління)	14
1.1.5 Переваги та загальні недоліки автоматизації	16
1.2 Системи теплиць: види, передові рішення, автоматизація	18
1.2.1 Класифікація теплиць	18
1.2.2 Передові рішення та приклади.....	21
1.2.3 Переваги та недоліки різних систем теплиць	22
1.2.4 Системи автоматизації, що використовуються в теплицях, та особливості їх застосування при короткому циклі вирощування.....	23
1.3 Автоматизація поливу та зволоження повітря: концепція та застосування....	25
1.3.1 Полив та зволоження як частина мікроклімату теплиці.....	25
1.3.2 Гідравлічні системи поливу та зволоження	26
1.3.3 Реалізація автоматизації поливу та зволоження повітря	27
1.4 Конкретні датчики, вузли та системи для проектованої теплиці.....	28
1.4.1 Датчики	28
1.4.2 Контролери та виконавчі пристрої.....	32
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ТА ПРОЕКТУВАННЯ СМАРТ-СИСТЕМА ПОЛИВУ ТА ЗРОШУВАННЯ ДЛЯ ТЕПЛИЦІ З 40-ДЕННИМ ЦИКЛОМ ВИРОЩУВАННЯ ГОРОДИНИ.....	35
2.1 Постановка задачі	35
2.2 Розрахунок гідравлічної системи	37
2.2.1 Розрахунок потрібної кількості форсунок зволоження повітря	37
2.2.2. Розрахунок розмірів для проектування форсунки для зволоження повітря	41
2.2.2.1 Розрахунок деталі сопло	43
2.2.2.2 Розрахунок деталі «корпус форсунки».....	44
2.2.2.3 Розрахунок зворотнього клапану.....	45
2.2.3 Проектування гідравлічної системи зволоження повітря та поливу в теплиці.....	48
2.2.4 Розробка нової системи зволоження повітря в теплиці	50

2.2.5	Опис роботи системи зволоження повітря.....	50
2.2.6	Розрахунок трубопроводу системи зволоження повітря.....	51
2.2.6.1	Визначення втрат по довжині трубопроводу.....	54
2.2.6.2	Втрати тиску на тертя.....	54
2.2.6.3	Втрати на місцевих опорах:.....	56
2.2.6.4	Розрахунок втрат на гідроапаратах.....	57
2.2.7	Підбір гідравлічного обладнання для системи зволоження повітря.....	59
2.2.8	Розробка нової системи краплинного поливу в теплиці.....	63
2.3	Симуляція роботи форсунки для системи зволоження повітря в теплиці	67
2.3.1	Гідродинамічна симуляція внутрішнього потоку форсунки в середовищі SolidWorks Flow Simulation.....	68
2.3.2	Міцнісний аналіз конструкції форсунки за допомогою модуля SolidWorks Simulation	74
2.3.3	Симуляція розпилення форсунки	77
2.4	Створення електросхеми системи автоматичного зволоження повітря в теплиці та краплинного поливу.....	79
2.4.1	Симуляція роботи електро-гідравлічної системи	84
2.4.2	Підбір електричного обладнання.....	87
2.4.3	Написання коду для мікроконтролера Arduino Nano	91
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЄКТУ		95
3.1	Опис ідеї проєкту.....	95
3.2	Технологічний аудит ідеї проєкту.....	98
3.3.	Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту	99
3.4.	Розроблення ринкової стратегії проєкту	107
3.5.	Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту	110
РОЗДІЛ 4. ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ		116
4.1	Завдання на розробку технологічного процесу	116
4.2	Вибір заготовки.....	117
4.3	Розробка маршрутного технологічного процесу.....	117
4.4	Вибір різального інструменту. Розрахунок режимів різання	119
4.5	Написання управляючих програм.....	121
ВИСНОВКИ		124
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....		125

ВСТУП

Сучасне сільське господарство потребує ефективних рішень для раціонального використання води та підтримання стабільного мікроклімату в теплицях. Автоматизовані системи поливу та зволоження повітря стають ключовим інструментом підвищення продуктивності та якості вирощуваної продукції, водночас зменшуючи витрати ресурсів.

Метою даного магістерського дисертації є розробка комплексної гідравлічної та автоматизованої системи поливу і зволоження повітря в теплиці, що включає технічне проєктування, підбір обладнання, комп'ютерне моделювання та створення алгоритмів керування.

У ході дослідження проведено аналіз існуючих технологій мікроклімату, визначено їхні сильні та слабкі сторони. Розроблено гідравлічну схему системи та виконано розрахунки необхідного тиску, витрати води й параметрів насосного обладнання. Окремо визначено необхідну кількість форсунок зволоження, виходячи з площі теплиці, вимог до вологості та рівномірності розподілу водяного аерозолю. На основі цього сформовано граничні умови для подальших симуляцій — тиск на вході, витрата, діаметр сопла, кут розпилення.

Для аналізу роботи системи використано комп'ютерне моделювання:

- у SolidWorks Flow Simulation досліджено гідродинаміку всередині форсунки та розподіл тиску;
- у ANSYS Fluent виконано моделювання розпилення методом DPM, що дозволило оцінити розмір крапель, радіус покриття та оптимізувати конструкцію.

Розроблено автоматизовану систему керування, що включає датчики вологості повітря, ґрунту та температури. Для контролера FESTO та мікроконтролерів Arduino створено програмне забезпечення, яке забезпечує збір даних, обмін сигналами та роботу насосів і клапанів у автоматичному режимі.

Отримані результати можуть бути використані для модернізації існуючих теплиць або створення нових об'єктів із сучасною автоматизованою системою керування мікрокліматом, яка забезпечує високу точність, енергоефективність та надійність роботи.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ

1.1 Автоматизація: поняття, завдання, елементи та застосування

1.1.1 Що таке автоматизація

Автоматизація (від латів. *automatus* - самостійно діючий) - це впровадження технічних засобів управління та контролю, що забезпечують автоматичне виконання заданих функцій без (або з мінімальним) втручанням людини. У широкому значенні автоматизація охоплює процеси збирання інформації (датчики), прийняття рішень (контролери, програмне забезпечення), і на об'єкт (виконавчі механізми) з метою підтримки необхідних параметрів роботи, підвищення ефективності, надійності, безпеки та зниження витрат праці та ресурсів.

Ключові завдання автоматизації включають комплексний моніторинг поточного стану технологічного процесу, що передбачає вимірювання параметрів, збирання та обробку даних у реальному часі. На основі цих даних здійснюється управління виконавчими пристроями за допомогою алгоритмів різного рівня складності, таких як PID-регулятори, логічні схеми та програмовані логічні контролери (ПЛК).

Автоматизація спрямована на оптимізацію використання ресурсів — води, енергії, сировини, добрив та інших матеріалів, що забезпечує економічну ефективність та екологічну безпеку. Вона значно знижує вплив людського фактора, мінімізуючи ризики помилок, втоми або суб'єктивного оцінювання.

Сучасні системи автоматизації також забезпечують можливість віддаленого контролю, аналізу та прогнозування роботи технологічних процесів через IoT-пристрої — це сенсори, датчики, виконавчі механізми та інші пристрої, підключені до Інтернету, які збирають дані та обмінюються ними з центральними системами або хмарними платформами (Рис. 1.1).

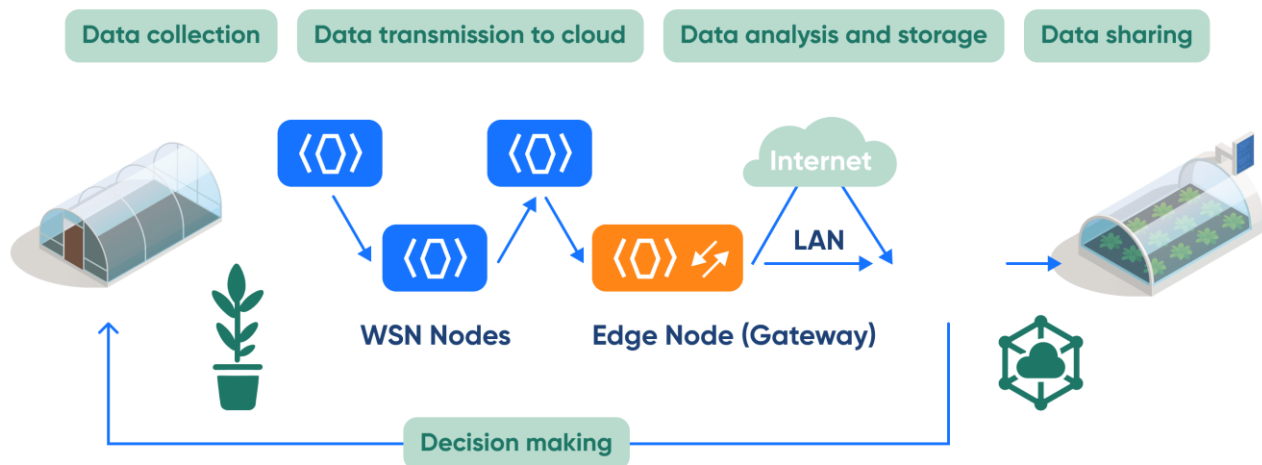


Рисунок 1.1 Процес смарт теплиці: збирання даних, передача, аналіз, зберігання та спільне використання [1]

Крім того, автоматизація підвищує надійність, стабільність та безперервність процесів, дозволяє швидко адаптувати виробництво до змін умов, здійснювати раннє виявлення відхилень та аварійних ситуацій і підвищує загальний рівень безпеки технологічних систем.

1.1.2 Області застосування автоматизації

Автоматизація проникла практично у всі галузі: промисловість (верстати, виробничі лінії), транспорт і логістика, «розумні» будівлі, енергосистеми, сільське господарство — зокрема тепличне господарство. У контексті сільського господарства автоматизація особливо актуальна при вирощуванні в контрольованому середовищі — теплицях, гідропонних установках, вертикальних фермах, оскільки вона дозволяє значно підвищити врожайність і якість продукції, а також зменшити витрати праці та ресурсів. Наприклад, сучасні дослідження підкреслюють важливість автоматизованих систем зрошення, зволоження, освітлення, вентиляції для сталого управління тепличним середовищем. [2]

Додатково: автоматизація у тепличному господарстві дозволяє впроваджувати системи в реальному часі моніторингу мікрокліматичних параметрів (температура, вологість, освітленість, концентрація CO₂), і на їх основі здійснювати коригування режимів роботи (наприклад, змінювати

графіки поливу чи вентиляції) з використанням алгоритмів IoT-пристроїв та хмарних платформ. [3]

Крім того, автоматизовані теплиці стикаються із викликами енергоефективності: системи опалення, охолодження та освітлення споживають значну кількість енергії, тож автоматизація також спрямована на моделювання енергоспоживання, впровадження матеріалів із кращою теплоізоляцією та оптимізацію використання сонячної чи відновлюваної енергії.[4]

1.1.3 Елементи гідравлічної автоматизації

Автоматизація гідравлічних систем, що використовуються для поливу, зволоження та циркуляції води або поживних розчинів, включає декілька ключових компонентів. По-перше, це датчики та вимірювальні пристрої, які контролюють рівень води, тиск, витрата, вологість, провідність (ЕС), рН розчину та температуру. Сенсори субстрату (moisture sensors) дозволяють автоматизувати полив та знижувати витрату води.[5]



Рисунок 1.2 Контролер (ПЛК) Siemens SIMATIC S7-1200 [6]

По-друге, контролери - програмовані логічні контролери (ПЛК), наприклад Siemens SIMATIC S7-1200 (Рис. 1.2), приймають сигнали від датчиків і керують виконавчими механізмами.[6] До виконавчих механізмів відносяться електромагнітні клапани, насоси, форсунки, розпилювачі, вентилятори та заслінки. Управління здійснюється через системи SCADA,

людино-машинні інтерфейси (НМІ) та хмарні IoT-платформи. Для зв'язку та інтеграції використовуються інтерфейси Modbus, Ethernet, бездротові мережі LoRaWAN та WiFi, а в IoT-системах застосовуються сенсори, шлюзи та хмарні платформи.[7] Алгоритми керування підтримують задані параметри, такі як вологість субстрату, температура і освітленість, із зворотним зв'язком: при зниженні вологості нижче порога включається полив, при сухому повітрі - зволоження. Сучасні системи додатково оптимізують роботу гідравліки, мінімізують енергоспоживання та втрати рідини, враховують правильне розташування та захист датчиків, а також надають аналітику, прогнозують обслуговування обладнання та допомагають виявляти відхилення у роботі системи. Таким чином, гідравлічна автоматизація являє собою комплексну систему сенсорів, виконавчих пристроїв, комунікацій та алгоритмів, що забезпечує точне, економне та надійне управління водними та поживними потоками в тепличних та гідропонних установках.

1.1.4 Типи автоматизації (за рівнем та за способом управління)

Сучасні системи автоматизації можна класифікувати за рівнем інтеграції, способом управління та характером регульованих процесів.

За рівнем інтеграції розрізняють кілька типів. Найпростіший рівень — це автономні пристрої та реле часу, які виконують заздалегідь задані дії, наприклад, увімкнення насосів, вентиляторів або освітлення за таймером, без аналізу поточного стану системи. Наступний рівень - програмовані логічні контролери (ПЛК) та пристрої з жорсткою логікою, здатні отримувати сигнали від датчиків та керувати виконавчими механізмами за заданими алгоритмами. Найбільш просунутий рівень представляють «розумні» (Smart) системи, що використовують IoT-технології, хмарні рішення та аналітику. Такі системи збирають дані з множини сенсорів, передають їх у хмару для аналізу та прогнозування, а потім адаптують управління в режимі реального часу. Вони забезпечують високий рівень точності, енергоефективності та дозволяють користувачеві контролювати процес дистанційно через комп'ютер або мобільний додаток.

За способом управління автоматизація поділяється на системи з відкритим та замкнутим контуром. У відкритому контурі керування здійснюється за заздалегідь заданою програмою або розкладом, без перевірки фактичного результату - наприклад, полив виконується кожні 6 годин, незалежно від вологості ґрунту. У замкнутому контурі використовується зворотний зв'язок: система вимірює параметр (вологість, температуру, концентрацію CO₂), порівнює його із заданим значенням та коригує роботу обладнання. Такий підхід забезпечує стійкість, точність і адаптацію до умов, що змінюються.[8]

По виду керованого процесу автоматизація може охоплювати кілька напрямків: гідравлічні системи поливу, розпилення та зволоження; клімат-контроль (регулювання температури, вологості, вентиляції та притінення); керування поживними розчинами та добривами (фертигація) з точним дозуванням; а також керування освітленням, CO₂-збагаченням та параметрами мікроклімату для оптимального росту рослин. На додаток до цих напрямків все частіше впроваджуються інтелектуальні системи аналізу даних та передиктивного управління, які здатні прогнозувати зміни зовнішніх умов, оптимізувати енергоспоживання та автоматично формувати сценарії роботи обладнання залежно від сезону, часу доби чи стану рослин.

Таким чином, типи автоматизації варіюються від простих автономних пристроїв до інтелектуальних комплексних рішень, інтегрованих з IoT та штучним інтелектом, що дозволяє створювати стійкі, економічні та високоефективні системи керування технологічними процесами.



Рисунок 1.3 Приклад насосної станції з блоками керування та системою датчиків [9]

1.1.5 Переваги та загальні недоліки автоматизації

Автоматизація технологічних процесів, включаючи тепличні та сільськогосподарські системи, має низку істотних переваг, які роблять її невід'ємною частиною сучасного виробництва. Насамперед, вона сприяє підвищенню продуктивності: завдяки точному контролю параметрів середовища — температури, вологості, освітленості та харчування — рослини отримують оптимальні умови для зростання, що дозволяє досягти стабільного та високого врожаю. Крім того, автоматизація значно знижує витрати ресурсів — води, добрив та електроенергії, оскільки системи керуються на основі показань датчиків, виключаючи перевитрату та забезпечуючи раціональне використання ресурсів. Важливою перевагою є і зниження трудовитрат: автоматизовані процеси зменшують потребу в ручній роботі, знижують ймовірність помилок та залежність від людського фактора. Сучасні рішення

також надають можливість дистанційного контролю та моніторингу, дозволяючи користувачеві керувати системою через мобільні програми або веб-інтерфейси з будь-якої точки світу. Ще одна значуща перевага — покращення мікроклімату та зниження ризику захворювань рослин: стабільні параметри середовища зменшують стресові ситуації та запобігають розвитку патогенних мікроорганізмів.

Проте автоматизація має певні недоліки. Головний із них — висока первісна вартість: закупівля датчиків, контролерів, виконавчих механізмів, обладнання зв'язку та встановлення потребують значних інвестицій. Крім того, такі системи складні в проектуванні та експлуатації, що потребує кваліфікованих фахівців із знаннями в галузі автоматики, електроніки та програмування. Можливі технічні проблеми: збої датчиків, засмічення насосів або помилки в програмному забезпеченні потребують регулярного обслуговування та калібрування. Ще одним обмеженням є залежність від електропостачання та інтернет-з'єднання — за їх відсутності робота системи може бути порушена. Важливо також враховувати ризик неправильного налаштування: некоректні параметри алгоритмів можуть призвести до неефективної чи хибної роботи обладнання. Для IoT-рішень додається потенційна вразливість до кібератак та втрати даних, що потребує надійного захисту мережевої інфраструктури.

Таким чином, автоматизація забезпечує високу ефективність, точність та стійкість процесів, але вимагає грамотного проектування, фінансових вкладень та регулярного технічного обслуговування для підтримки стабільної роботи.[10]

1.2 Системи теплиць: види, передові рішення, автоматизація

1.2.1 Класифікація теплиць

Теплиця - це захищена споруда, призначена для створення та підтримки оптимального мікроклімату, що дозволяє значно підвищити ефективність вирощування рослин у порівнянні з відкритим ґрунтом. Сучасні теплиці розрізняються за конструкцією, матеріалом покриття, способом вирощування культур і рівнем автоматизації, що визначає їх функціональність, енергоефективність та ступінь технологічного розвитку.



Рисунок 1.4 Теплиця з покриттям з поліетиленової плівки

За конструкцією та матеріалом покриття розрізняють кілька типів теплиць. Прості арочні або тунельні теплиці з покриттям з поліетиленової плівки - найбільш доступний та економічний варіант, що часто застосовується для сезонного вирощування овочів та зелені (Рис 1.4). Більш складні та довговічні конструкції виконуються зі скла, полікарбонату або багатошарової плівки, що забезпечує кращу теплоізоляцію, стійкість до зовнішніх впливів та можливість цілорічного використання (Рис 1.5).



Рисунок 1.5 Теплиця антрацит [11]

Сучасні теплиці все частіше оснащуються системами автоматичного керування мікрокліматом - вентиляцією, затіненням, підігрівом та охолодженням, що робить їх незалежними від погодних умов та підвищує стабільність урожаю (Рис 1.6).



Рисунок 1.6 Приклад теплиці з інтегрованими смарт системами [11]

За способом вирощування рослин теплиці поділяються на традиційні та безгрунтові. У традиційних теплицях рослини ростуть у ґрунтовому чи субстратному шарі, а харчування та вологу отримують через систему поливу. У гідропонних теплицях ґрунт замінюється поживним розчином, що подається до коренів у контрольованих умовах. Найбільш поширені технології – DWC (Deep Water Culture) та NFT (Nutrient Film Technique), які забезпечують точне дозування поживних речовин та води, підвищуючи ефективність використання ресурсів. Окремий напрямок представляють вертикальні ферми та багат шарові теплиці, що розміщені всередині будівель. Такі «розумні» рішення дозволяють вирощувати продукцію в міських умовах, заощаджуючи площу та енергію за допомогою світлодіодного освітлення та автоматизованого клімат-контролю.

За рівнем автоматизації теплиці можна умовно поділити на три категорії. Перша - теплиці з мінімальною механізацією, де більшість процесів (провітрювання, полив, керування освітленням) виконується вручну або за допомогою простих таймерів. Друга — напівавтоматизовані теплиці, оснащені датчиками та контролерами, які виконують частину функцій автоматично, проте потребують періодичного втручання оператора. Третя категорія - повністю автоматизовані "смарт-теплиці", що поєднують системи клімат-контролю, поливу, освітлення та живлення в єдину цифрову платформу. Такі комплекси забезпечують дистанційний моніторинг, збирання та аналіз даних, керування кількома зонами вирощування та дозволяють значно підвищити врожайність (на 10–20 %) при одночасному зниженні трудовитрат та витрати ресурсів.

Таким чином, розвиток тепличних технологій рухається у бік інтелектуальних та енергоефективних рішень, що забезпечують стійке виробництво, стабільну якість продукції та оптимальне використання ресурсів за мінімальної участі людини.[12]

1.2.2 Передові рішення та приклади

Сучасні тепличні комплекси активно впроваджують інноваційні технології автоматизації, спрямовані на підвищення ефективності, стійкості та керованості виробничих процесів. Розглянемо кілька прикладів передових рішень, що застосовуються у світовій практиці.

Приклад 1: Автоматизована гідропонна теплиця

Сучасні комерційні гідропонні теплиці є високотехнологічними комплексами, в яких автоматизація охоплює не тільки полив, а й процеси дозування поживних речовин, регулювання мікроклімату, освітлення та вентиляції. Система керується за допомогою контролерів та сенсорів, які відстежують концентрацію живильного розчину (ЕС), рівень рН, температуру води та повітря, а також інтенсивність освітлення. Такі теплиці забезпечують повний контроль над кореневим та повітряним середовищем, що дозволяє отримувати стабільні врожаї протягом усього року незалежно від погодних умов. Основні переваги – висока врожайність, раціональне використання ресурсів та можливість цілорічного виробництва. До недоліків належать висока капітальна вартість, необхідність залучення кваліфікованого персоналу та складність обслуговування обладнання та програмного забезпечення. [9]

Приклад 2: Інтегровані IoT-теплиці

Одним з найбільш динамічно розвиваються є впровадження IoT-технологій (Інтернету речей) у тепличне виробництво. Такі системи використовують мережу датчиків для вимірювання параметрів мікроклімату – рівня CO₂, вологості повітря та субстрату, температури, освітленості – та передають дані у хмарну платформу для аналізу. На основі цих даних автоматично коригуються режими поливу, вентиляції та освітлення, що забезпечує адаптацію системи до зовнішніх умов у реальному часі. Переваги таких теплиць полягають у можливості віддаленого керування та моніторингу, високої точності та гнучкості в управлінні ресурсами. Основні недоліки – залежність від стабільності інтернет-з'єднання, питання кібербезпеки та необхідність інвестицій в IT-інфраструктуру та обслуговування.[13]

Приклад 3: Модульні автоматизовані системи для комерційного вирощування

Сучасні професійні системи автоматизації теплиць розробляються з акцентом на модульність та масштабованість. Це дозволяє адаптувати обладнання під конкретні завдання – від невеликих ферм до промислових тепличних комплексів. Такі рішення включають інтеграцію штучного інтелекту (AI), який аналізує накопичені дані та пропонує оптимальні сценарії управління кліматом та харчуванням. Модульна архітектура спрощує модернізацію та розширення системи без необхідності повної заміни обладнання. Серед переваг — висока гнучкість, надійність, сумісність із різними типами датчиків та можливість поступового нарощування виробничих потужностей. Недоліки пов'язані зі складністю вибору конфігурації, високою вартістю впровадження та ризиком перевищення бюджету на етапі налаштування та інтеграції.[14]

Таким чином, сучасні передові рішення в галузі тепличної автоматизації демонструють тенденцію до повної цифровізації та інтеграції всіх підсистем, де головну роль відіграють інтелектуальні алгоритми, IoT-технології та модульні архітектури, що забезпечують стійке та економічно ефективне виробництво.

1.2.3 Переваги та недоліки різних систем теплиць

Сучасні теплиці, особливо автоматизовані, мають ряд істотних переваг у порівнянні з традиційним вирощуванням рослин у відкритому ґрунті. Головна перевага полягає у можливості повного контролю мікроклімату – регулювання температури, вологості, освітленості, вентиляції та концентрації CO₂. Це забезпечує оптимальні умови для росту рослин незалежно від сезону та погодних умов. Завдяки цьому теплиці дозволяють вести вирощування цілий рік або значно продовжувати сезон, забезпечуючи стабільні врожаї та прогнозовану якість продукції. Ще одна важлива перевага — висока продуктивність на обмеженій площі: урожайність на квадратний метр у теплиці може бути у кілька разів вищою, ніж на відкритому полі.

Контрольоване середовище також знижує вплив зовнішніх факторів, таких як заморозки, посуха, шкідники та хвороби, що мінімізує втрати та скорочує використання пестицидів. У поєднанні з автоматизацією тепличне господарство забезпечує значну економію води, добрив та людської праці, підвищуючи загальну ефективність виробництва.

Тим не менш, тепличні системи мають свої недоліки. Одним із головних є висока капітальна вартість: будівництво тепличних комплексів, встановлення систем автоматизації, клімат-контролю, поливу та освітлення потребують значних інвестицій. Експлуатація таких систем також складніша, оскільки вона передбачає наявність кваліфікованого персоналу, здатного обслуговувати обладнання, контролювати програмне забезпечення та проводити технічне обслуговування. При круглорічному виробництві, особливо в холодних кліматичних зонах, зростають енерговитрати на опалення, освітлення та вентиляцію. Крім того, помилки в проектуванні або налаштуванні автоматизації можуть призвести до аварій — наприклад, перезволоження субстрату, поломка насосів або загибель рослин через перегрівання. У гідропонних та вертикальних системах додається необхідність постійного контролю параметрів живильного розчину, таких як рівень рН та електропровідність (ЕС), що ускладнює керування та потребує додаткового обладнання.

Таким чином, тепличні системи надають значні можливості для підвищення ефективності та стійкості агровиробництва, проте їхня успішна експлуатація потребує грамотного проектування, технічної компетенції та відповідального підходу до обслуговування автоматизованих процесів.

1.2.4 Системи автоматизації, що використовуються в теплицях, та особливості їх застосування при короткому циклі вирощування

Сучасні теплиці є складними автоматизованими комплексами, в яких взаємодіють кілька взаємопов'язаних підсистем. Основу складає система кліматичного контролю, що відповідає за підтримку оптимальних параметрів температури, вологості та газового складу повітря. До неї входять датчики

мікроклімату, системи вентиляції, опалення та охолодження, а також модулі затемнення та освітлення. Додатково використовується CO₂-збагачення, що сприяє прискоренню фотосинтезу та підвищенню врожайності. У низці досліджень зазначається, що саме кліматична система є «серцем» автоматизованої теплиці, забезпечуючи стабільність та рівномірність умов вирощування.

Другий ключовий елемент - система поливу, зволоження та дренажу. Вона включає датчики вологості ґрунту або субстрату, насоси, електромагнітні клапани, а також пристрої туманоутворюючого та крапельного поливу. Контролери регулюють роботу цих компонентів на основі сигналів сенсорів, забезпечуючи точну подачу води лише за необхідності. Часто такі системи інтегруються з блоком добрив (fertigation), який дозує живильні розчини з урахуванням електропровідності (EC) та рівня pH. Автоматична фертигація дозволяє як знизити витрати ресурсів, а й забезпечити рослини збалансованим харчуванням у необхідні періоди їх розвитку.

Окреме місце займає система освітлення та регулювання фотоперіоду. Сучасні LED-світильники управляються контролерами, здатними змінювати інтенсивність та спектр світла залежно від фази росту рослини чи природної освітленості. Це особливо важливо у зимовий період або при вирощуванні культур у північних широтах.

Невід'ємною частиною сучасних теплиць є система моніторингу та віддаленого доступу. IoT-датчики та шлюзи збирають дані, передають їх у хмарні платформи, де здійснюється аналіз та візуалізація параметрів. Користувач отримує можливість керувати теплицею через веб-інтерфейси або мобільні програми, а система в автоматичному режимі сповіщає про збої, відхилення або аварії.

Значна увага приділяється інтеграції всіх підсистем та зональному управлінню. Сучасні контролери, такі як рішення Autogrow або GrowDirector, дозволяють розділяти теплицю на зони і керувати кожною з них незалежно -

наприклад, за типом культури, фазою зростання або мікрокліматом. Це робить систему, що масштабується і легко адаптується під конкретні завдання.

Особливості автоматизації для теплиць з коротким циклом вирощування (наприклад, 40 днів) потребують більш високої точності, швидкодії та адаптивності. У таких теплицях процеси відбуваються швидше, і кожна фаза зростання – проростання, вегетативний розвиток, формування та збирання врожаю – потребує свого набору параметрів мікроклімату, поливу та живлення. Система повинна забезпечувати швидку реакцію на зміни вологості та температури, точне дозування води та добрив, а також можливість створення та збереження «рецептів» умов для різних стадій зростання. Важливо також передбачити автоматичне керування зволоженням повітря в зоні рослин, особливо при щільних посадках, щоб мінімізувати ризик перегріву або пересушування. Крім того, такі системи мають бути легко перенастроюваними, забезпечуючи мінімальні інтервали між циклами вирощування та максимально ефективного використання часу, обладнання та ресурсів.

Таким чином, сучасні системи автоматизації теплиць є інтегрованими рішеннями, що об'єднують управління кліматом, поливом, живленням, освітленням і моніторингом, а при коротких циклах вирощування — забезпечують гнучкість, точність і високу адаптивність до швидкої зміни умов росту рослин.[15]

1.3 Автоматизація поливу та зволоження повітря: концепція та застосування

1.3.1 Полив та зволоження як частина мікроклімату теплиці

Полив рослин та зволоження повітря в теплиці — критично важливі процеси: вони безпосередньо впливають на зростання, розвиток, здоров'я рослин і, зрештою, урожай. В автоматизованій теплиці ці процеси мають бути інтегровані із системою керування мікрокліматом.

Зволоження повітря робить середовище більш сприятливим: зменшує стрес рослин, знижує випаровування, може підвищити ефективність

фотосинтезу. Полив субстрату або кореневої зони забезпечує рослини вологою та живленням.

1.3.2 Гідравлічні системи поливу та зволоження

Гідравлічні системи поливу та зволоження є одним із ключових елементів автоматизованих тепличних комплексів, забезпечуючи рослини оптимальною кількістю води та поживних речовин за мінімальних втрат ресурсів. У сучасних умовах такі системи проектуються з високим ступенем точності та адаптації до конкретних культур та методів вирощування.

Одним із найпоширеніших типів є краплинний полив (drip irrigation) — технологія, за якої вода подається безпосередньо до кореневої зони рослин через систему крапельниць. Така система дозволяє значно скоротити витрату води та запобігти перезволоженню. Автоматизація здійснюється за допомогою електромагнітних клапанів, програмованих контролерів та датчиків вологості, що забезпечує індивідуальне керування подачею води для різних зон теплиці.

Системи туманоутворення (misting/fogging) застосовуються переважно для регулювання вологості та температури повітря, створюючи дрібнодисперсну хмару води, яка швидко випаровується, знижуючи температуру та підвищуючи вологість без надмірного намокання рослин. Ці системи особливо ефективні при вирощуванні розсади або культур, чутливих до перегріву, часто інтегруються з кліматичними контролерами, які регулюють частоту і тривалість розпилення в залежності від поточних показань датчиків.

Системи поливу з використанням субстратів або ґрунту оснащуються сенсорами вологості, які автоматично активують подачу води при зниженні вологості нижче заданого рівня. Це забезпечує точний водний баланс і запобігає стресу рослин від пересихання або перезволоження. Датчики можуть бути встановлені на різних глибинах, що дозволяє враховувати профіль вологості у кореневій зоні.

У гідропонних рішеннях – таких як DWC (Deep Water Culture), NFT (Nutrient Film Technique) та Ebb & Flow (затока та злив) – гідравлічна система

стає частиною замкнутого циклу, забезпечуючи постійну циркуляцію живильного розчину. Автоматизація таких систем включає насоси, мікродозатори, клапани та датчики, що контролюють температуру, електропровідність (ЕС) та рівень рН розчину. Це дозволяє точно регулювати склад і обсяг рідини, що подається, що особливо важливо для швидкорослих культур і систем з коротким циклом вирощування.

Додатково сучасні теплиці використовують системи рециркуляції та водопідготовки, що включають фільтрацію, знезараження та повторне використання води. Такі рішення дозволяють знизити витрати ресурсів та мінімізувати екологічний вплив виробництва. Контроль здійснюється через датчики каламутності, тиску та витрати, а також автоматичні клапани, що забезпечують баланс між подачею свіжої та зворотної води.

Таким чином, гідравлічні системи поливу та зволоження в сучасних теплицях є інтегрованими автоматизованими комплексами, що поєднують точне дозування, моніторинг та управління водними ресурсами. Вони не тільки забезпечують оптимальні умови для росту рослин, але й сприяють стійкому та енергоефективному виробництву, знижуючи вплив людського фактора та збільшуючи загальну ефективність тепличного господарства.

1.3.3 Реалізація автоматизації поливу та зволоження повітря

Автоматизована система поливу та зволоження повітря в теплиці є комплексом взаємопов'язаних пристроїв, що забезпечують точну підтримку оптимальних параметрів мікроклімату. Основу системи складають датчики, що вимірюють вологість і температуру повітря, вологість субстрату або ґрунту, рівень та тиск води, а також показники рН та електропровідності (ЕС) у гідропонних установках. Отримані дані надходять на контролер (наприклад, Siemens LOGO! або SIMATIC S7), який аналізує значення та керує виконавчими пристроями.

Виконавчі механізми включають насоси, електроклапани, туманоутворювачі та вентиляційні системи. Вони активуються відповідно до заданих алгоритмів — наприклад, при зниженні вологості субстрату нижче за

норму відкривається клапан поливу, а при сухому повітрі запускається система зволоження. У спеку система може автоматично включати туманоутворення та вентиляцію для охолодження.

Для управління та контролю використовуються людино-машинні інтерфейси (HMI), SCADA-системи або мобільні додатки, що дозволяють задавати параметри, відстежувати стан та отримувати повідомлення про збої.

Особлива увага приділяється алгоритмам управління фазами зростання. У теплицях із коротким циклом (близько 40 днів) система має швидко реагувати на зміни та підтримувати різні режими для стадій укорінення, зростання та дозрівання. Це досягається за рахунок «рецептів» поливу та зволоження, які задаються заздалегідь та автоматично застосовуються контролером.

В результаті автоматизація поливу та зволоження забезпечує точне регулювання параметрів середовища, економію води та енергії, зменшення ручної праці та стабільні умови для прискореного росту рослин.

1.4 Конкретні датчики, вузли та системи для проектованої теплиці

1.4.1 Датчики

Для ефективної автоматизації теплиці застосовують різні типи датчиків, що забезпечують точний контроль параметрів навколишнього середовища і роботи інженерних систем.

Датчик вологості субстрату (Soil/Substrate Moisture Sensor) - вимірює рівень вологості в кореневій зоні рослин і дозволяє автоматично вмикати полив при досягненні заданого порога. На практиці часто застосовуються ємнісні сенсори, такі як DFRobot SEN0193 (Рис. 1.7) або Decagon EC-5, що відрізняються високою точністю та стійкістю до корозії.

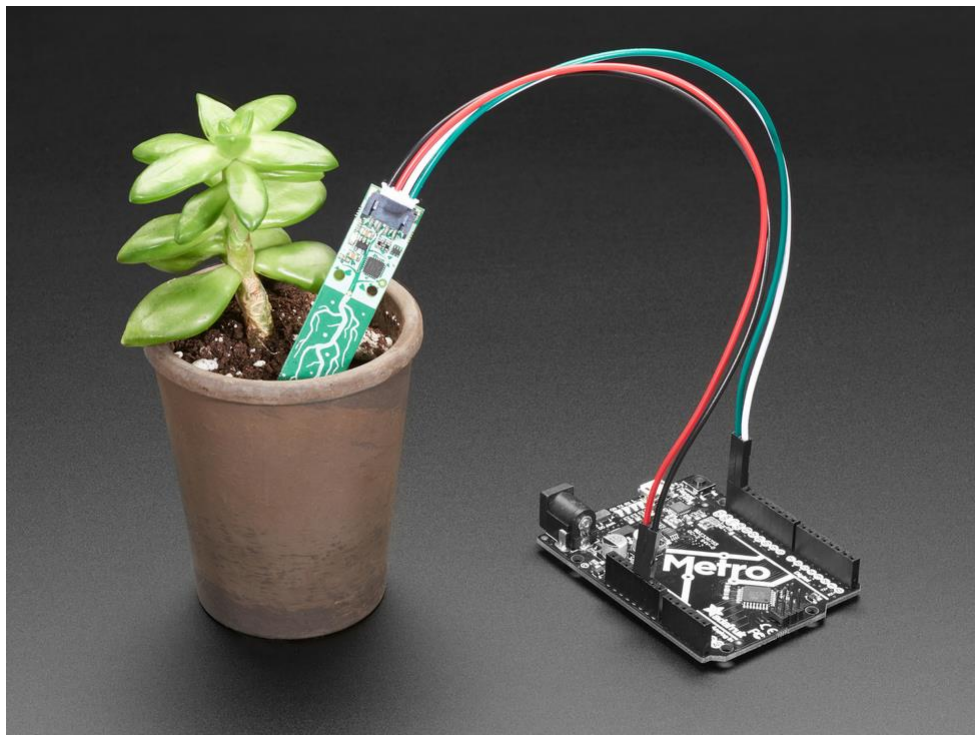


Рисунок 1.7 Датчик вологості субстрату DFRobot SEN0193[16]

Датчик температури повітря (Air Temperature Sensor) – контролює температуру в теплиці та передає дані контролеру для регулювання вентиляції, опалення та систем зволоження. Найбільш поширені датчики типу DS18B20 чи промислові версії на основі PT100/PT1000.

Датчик відносної вологості повітря (RH Sensor) – використовується для автоматичного керування системами туманоутворення та вентиляції. Приклади: SHT31 (Sensirion) або DHT22 (AM2302), що забезпечують точне вимірювання вологості та температури одночасно.

Датчик освітленості (Lux / PAR Sensor) – вимірює інтенсивність світла в люксах або фотосинтетично активної радіації (PAR). Ці дані використовуються для коригування освітлення та режиму поливу. Найпоширеніші моделі: Apogee SQ-520 PAR Sensor (Рис 1.8) та BH1750, які часто застосовуються в «розумних» теплицях.



Рисунок 1.8 Датчик освітленості Apogee SQ-520 PAR Sensor [17]

Датчик CO₂ (Carbon Dioxide Sensor) – контролює концентрацію вуглекислого газу, необхідного для фотосинтезу. Використовується в теплицях із системою CO₂-збагачення. Приклади: МН-Z19В та SenseAir S8, що забезпечують високу точність та стабільність показань.

Датчик рівня води (Water Level Sensor) – відстежує кількість води в резервуарах та запобігає роботі насосів при низькому рівні рідини. У тепличних системах застосовують як поплавкові сенсори (WLC Float Switch), так і ультразвукові (JSN-SR04T, VEGA VEGASON).

Датчик витрати води / потоку (Flow Sensor) - вимірює обсяг води, що подається і допомагає виявляти виток або неполадки в системі поливу. Приклад: YF-S201 чи промислові моделі типу Siemens MAG 5100W (Рис 1.9).



Рисунок 1.9 Датчик витрати води Siemens MAG 5100W [18]

Датчик рН/ЕС – використовується для контролю складу живильного розчину в гідропонних та фертигаційних системах. Наприклад, рН-метри Atlas Scientific EZO-pH та ЕС-сенсори Bluelab Truncheon забезпечують точні показання та зручну інтеграцію з контролерами.

Датчик тиску в трубопроводі (Pressure Sensor) - застосовується для контролю стабільності роботи насосів та виявлення засмічення. Часто використовують промислові датчики, такі як Honeywell PX2 або Wika A-10, які забезпечують надійну роботу при зміні тиску в системі.

У сукупності ці сенсори формують основу «інтелектуального сприйняття» теплиці, дозволяючи системі точно аналізувати умови середовища та автоматично коригувати роботу всіх підсистем — від поливу та вентиляції до освітлення та подачі добрив.

1.4.2 Контролери та виконавчі пристрої

Система автоматизації теплиці ґрунтується на надійних контролерах, виконавчих пристроях та засобах зв'язку, що забезпечують точне керування всіма процесами.

Програмований логічний контролер (PLC) – центральний елемент керування системою. Наприклад, Siemens SIMATIC S7-1200 або Siemens LOGO! 8 здатні керувати насосами, електромагнітними клапанами, вентиляцією, освітленням та зволоженням. Вони підтримують підключення датчиків температури, вологості, рН та ЕС, а також інтеграцію із системами моніторингу через Ethernet або Modbus.

Модульні контролери та IoT-шлюзи – застосовуються у більш гнучких та масштабованих рішеннях. Наприклад, системи Autogrow, GrowDirector 3 PRO або TrolMaster Hydro-X дозволяють підключати десятки датчиків та керувати різними зонами теплиці через хмарну платформу або мобільний додаток.

Виконавчі пристрої:

- Електромагнітні клапани (наприклад, Rain Bird 100DV або Hunter PGM) управляють подачею води в окремі зони поливу.
- Насоси (наприклад, Grundfos CR або Pedrollo PKm60) – забезпечують циркуляцію та подачу води чи поживних розчинів.
- Туманоутворювачі / форсунки - застосовуються для зволоження та охолодження повітря; можуть керуватися окремими реле через контролер.
- Вентилятори та заслінки — регулюють повітрообмін та температуру, часто працюють у зв'язці з датчиками вологості та CO₂.

Інтерфейс користувача (HMI / SCADA / мобільний додаток) - забезпечує візуалізацію параметрів та віддалене керування. Приклад: Siemens WinCC, GrowDirector Cloud Dashboard, Autogrow IntelliGrow App.

Комунікаційні вузли — обмін даними між пристроями. У теплицях часто використовуються рішення на основі Wi-Fi, Ethernet, LoRaWAN або RS485 (Modbus RTU), що дозволяє зв'язати контролери, датчики та хмарні сервіси в єдину систему.

Сучасні контролери та виконавчі пристрої створюють основу «розумної» теплиці, забезпечуючи автоматичне керування кліматом, поливом та живленням за мінімальної участі людини.

Архітектура автоматизованої тепличної системи будується на принципі взаємодії датчиків, контролерів та виконавчих пристроїв із можливістю віддаленого моніторингу.

У всіх зонах теплиці встановлюються датчики вологості субстрату, температури, відносної вологості та освітленості, які передають дані на контролер або IoT-шлюз (через дротове з'єднання або бездротову мережу – Wi-Fi/LoRaWAN). Контролер (наприклад, Siemens S7-1200 або Autogrow IntelliClimate) аналізує інформацію та керує обладнанням:

- при зниженні вологості субстрату автоматично відкриває клапани поливу;
- при зниженні відносної вологості та підвищенні температури включає систему туманоутворення та вентиляцію;
- При надлишку світла активує систему затінення.

Всі дані надходять на хмарну платформу або SCADA-систему, де оператор може відстежувати параметри, отримувати повідомлення про несправності (низький рівень води, перегрів, засмічення клапанів) та коригувати налаштування.

Система передбачає резервні сценарії (наприклад, ручний запуск поливу при збої контролера) та поділ теплиці на зони, де кожна зона має власні датчики та пристрої, але керується з єдиної платформи. Така архітектура забезпечує стабільний мікроклімат, точне розподілення ресурсів і високу надійність при короткому (40-денному) циклі вирощування.

Висновок:

У ході проведеного дослідження було детально розглянуто структуру та принципи роботи автоматизованих систем, що застосовуються у тепличних комплексах. Проаналізовано ключові завдання автоматизації, галузі її застосування, елементи гідравлічних систем та сучасні тенденції розвитку технологій управління мікрокліматом. Особливу увагу приділено системам поливу та зволоження – від датчиків та контролерів до виконавчих механізмів та архітектури взаємодії між ними.

Вивчено різні типи теплиць та рівні автоматизації, показано переваги інтелектуальних (IoT) рішень та їх внесок у підвищення ефективності вирощування рослин. Розглянуто сильні та слабкі сторони автоматизованих систем, а також особливості проектування для теплиць з коротким циклом вирощування (40 днів), де потрібна висока точність та гнучкість керування параметрами середовища.

З аналізу даних можна зробити висновок, що впровадження комплексної системи автоматизації, що включає інтелектуальне управління поливом і мікрокліматом, забезпечує як стабільність врожаю та економію ресурсів, а й знижує залежність від людського фактора. Надалі планується розробка та реалізація власної автоматизованої системи поливу та зволоження, оптимізованої під конкретні умови теплиці, що дозволить підвищити продуктивність та стійкість сільськогосподарського виробництва.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ТА ПРОЕКТУВАННЯ СМАРТ-СИСТЕМА ПОЛИВУ ТА ЗРОШУВАННЯ ДЛЯ ТЕПЛИЦІ З 40-ДЕННИМ ЦИКЛОМ ВИРОЩУВАННЯ ГОРОДИНИ

2.1 Постановка задачі

У своїй магістерській дисертації я ставлю за мету розробити смарт систему поливу та зволоження повітря для тепличних комплексів, яка включатиме дві автономні підсистеми: систему краплинного поливу та систему туманоутворення. Ця система має працювати в автоматичному режимі за 40-денним циклом та забезпечувати оптимальні мікрокліматичні умови для вирощування різних культур.

Система краплинного поливу, що буде інтегрована в проект, є стандартною та може гнучко адаптуватися до конкретних потреб теплиці. Кількість трубопроводів, конфігурація магістралей, розташування та кількість отворів для подачі води можуть змінюватися залежно від площі та типу культур. Тому компоненти цієї підсистеми будуть обрані на основі існуючих рішень, представлених на ринку, з подальшим їх узгодженням із загальною архітектурою проекту.

На відміну від системи краплинного поливу, система зволоження повітря потребує значно більш точного інженерного опрацювання, оскільки її ефективність суттєво залежить від характеристик форсунок, параметрів розпилення та умов експлуатації в конкретній теплиці. Саме тому ключовим етапом дослідження стане аналітичний розрахунок необхідної кількості форсунок, їх продуктивності, діапазону робочого тиску та витрати води. Ці параметри мають забезпечити підтримання вологості повітря в межах 60–90%, залежно від вимог рослинних культур, що вирощуватимуться.

На початковому етапі роботи планується виконати розрахунок параметрів системи зволоження повітря, спираючись на геометричні характеристики теплиці та необхідну продуктивність комплексу. На основі цих вхідних даних будуть визначені ключові конструктивні параметри туманоутворювальної форсунки, зокрема діаметр сопла, форма розпилювального каналу, необхідний робочий тиск, витрата води та тип

розпилу, що забезпечуватиме утворення дрібнодисперсного туману з високою рівномірністю. Після формування вимог до форсунки планується перейти до проектування гідравлічної підсистеми системи зволоження. На цьому етапі буде виконано підбір насосного обладнання, фільтраційної апаратури та трубопровідної арматури, а також визначено конфігурацію трубопроводів високого тиску. Передбачається створення гідравлічної моделі системи з розрахунком втрат тиску та визначенням оптимальних режимів роботи всієї мережі.

Після завершення підбору гідравлічних компонентів та формування повної схеми водопостачання планується створити тривимірну модель форсунки у програмному середовищі SolidWorks. На її основі будуть проведені чисельні дослідження, включно з внутрішньою гідродинамічною симуляцією руху рідини, аналізом напружено-деформованого стану корпусу. Отримані результати дозволять уточнити геометрію форсунки та покращити характеристики потоку.

Для визначення ефективності утворення аерозольної хмари планується виконати моделювання процесу розпилення в Ansys Fluent із використанням методу DPM. Такий підхід дасть змогу проаналізувати рух частинок у повітрі, їхню швидкість, траєкторію, розподіл по об'єму теплиці та рівномірність туманоутворення. На основі CFD- та DPM-результатів буде можливо оцінити працездатність розробленої форсунки та визначити необхідні коригування конструкції.

Після завершення чисельних досліджень та підтвердження ефективності форсунки планується перейти до розробки електричної схеми автоматизації системи зволоження. Вона включатиме датчики вологості, контролери, виконавчі елементи та засоби інтелектуального керування. На заключному етапі передбачено розроблення алгоритмів керування та написання програмного забезпечення для забезпечення стабільної, енергоефективної та повністю автоматизованої роботи комплексу без необхідності участі оператора.

2.2 Розрахунок гідравлічної системи

2.2.1 Розрахунок потрібної кількості форсунок зволоження повітря

Маючи модель теплиці (Рис 2.1) та маючи її габаритні розміри (Рис 2.2) я можу розрахувати необхідну кількість форсунок туманоутворення для забезпечення постійної вологості повітря від 60% до 90%.

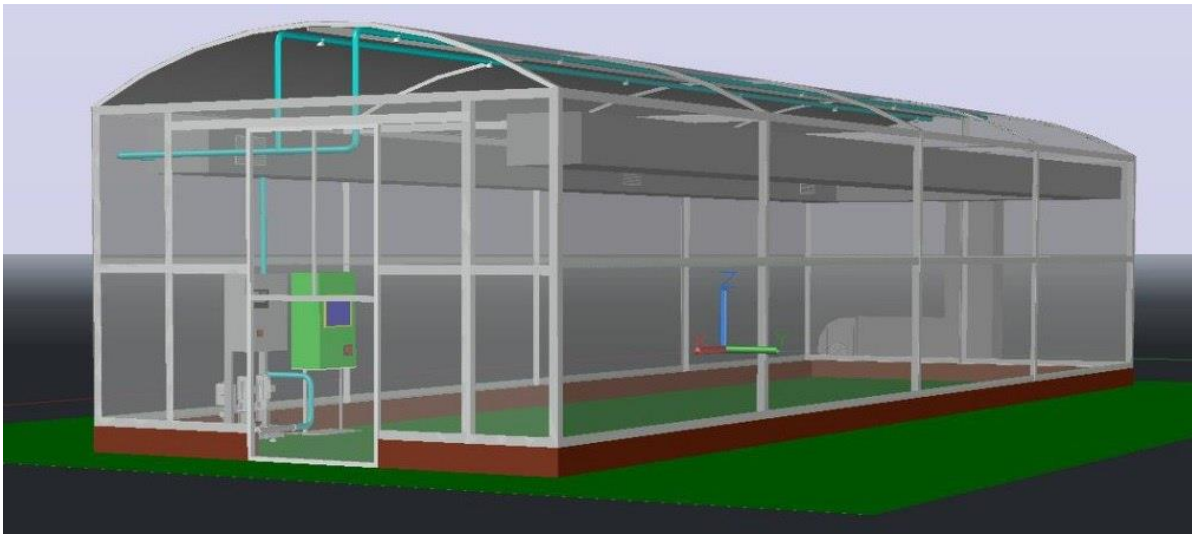


Рисунок 2.1 Загальний вигляд теплиці [19]

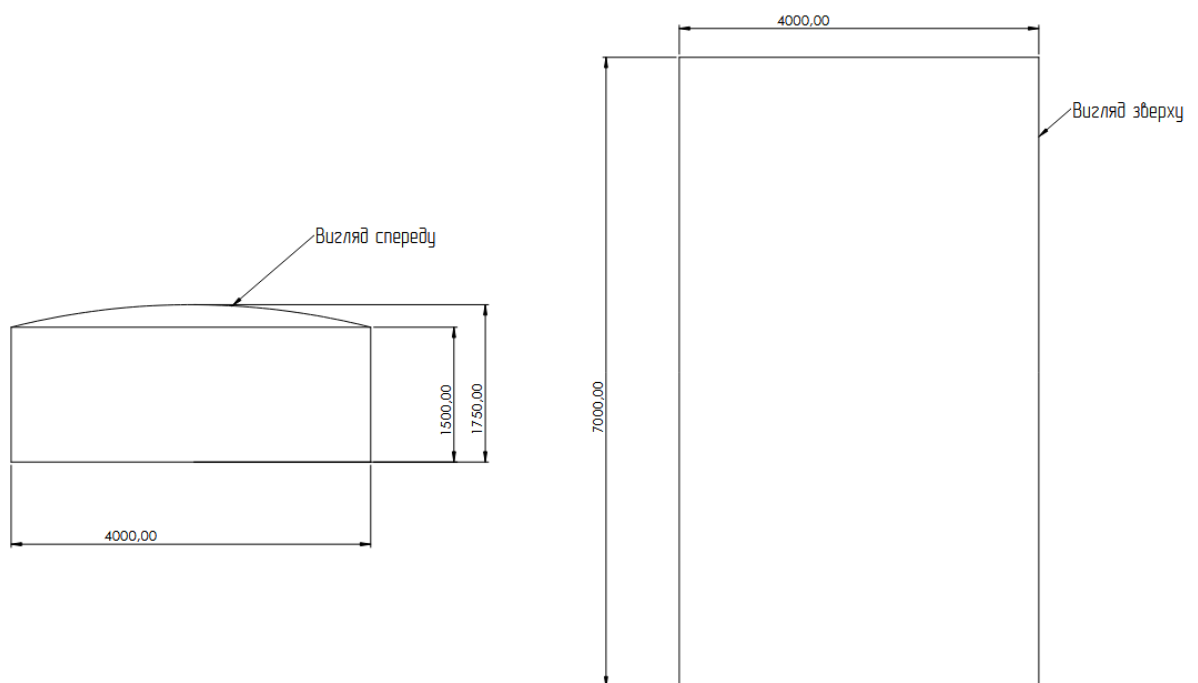


Рисунок 2.2 Габаритні розміри теплиці

Для початку треба дізнатися який об'єм повітря потрібно буде зволожувати. Для цього я використаю стандартну формулу об'єму паралелепіпеда:

$$V = a \cdot b \cdot c,$$

де a – ширина теплиці, b – довжина теплиці та c – висота [20].

Розмір теплиці: ширина 4 м, довжина 7 м, висота 1,7 м, тоді об'єм теплиці:

$$V = a \cdot b \cdot c = 4 \cdot 7 \cdot 1,7 = 47,6 \text{ (м}^3\text{)}$$

Також для розрахунку необхідної кількості форсунок для зволоження повітря в теплиці необхідно врахувати такі параметри:

Температура повітря – приймаю стандартне для кімнатної температури значення в $t = 25^\circ\text{C}$.

Витрата води – згідно зі своїми минулими дослідженнями приймаю, що витрати води для однієї форсунки сягає $Q = 0,16$ л/хв або 9,6 л/год.

Вхідна відносна вологість – для температури $t = 25^\circ\text{C}$ приймаю стандартне значення $\varphi = 40\%$.

Вентиляція – зважаючи на невизначеність, розрахую кілька сценаріїв кратності обміну повітря (ACH — air changes per hour, кількість повних замін об'єму повітря на годину): ACH = 0 (щільно закрито), 0,5, 1, 2, 3, що є типовими значеннями для теплиць.

Потрібні формули для розрахунку:

Переведення відносної вологості (φ) в абсолютну масу пари:

$$\rho_v = \varphi \cdot \rho_t,$$

де φ – вхідна відносна вологість, ρ_t - маса водяної пари при температурі $t = 25^\circ\text{C} \approx 23.07 \text{ г/м}^3$.

Кількість води в грамах на годину яку потрібно додавати, щоб компенсувати вентиляцію та підтримувати потрібну вологість:

$$M = V \cdot ACH \cdot \Delta\rho,$$

де V – об'єм теплиці, ACH – повітрообмін, $\Delta\rho$ – різниця абсолютної маси пару.

Необхідна кількість форсунок:

$$N = \frac{M/1000}{Q \cdot \eta},$$

де M – кількість води в грамах на годину яку потрібно додавати, щоб компенсувати вентиляцію та підтримувати потрібну вологість, Q – витрата води через одну форсунку, η - частка води, що випарувалася, приймаю, що форсунка дає ефективне випаровування при високому тиску та дрібній дисперсії $\eta \approx 0,8$.

Перейдемо до чисельного розрахунку:

Переведемо відносну вологості (φ) в абсолютну масу пари:

- При $\varphi = 40\%$

$$\rho_v = 0,40 \cdot 23,07 = 9,228 \text{ (г/м}^3\text{)};$$

- При $\varphi = 60\%$

$$\rho_v = 0,60 \cdot 23,07 = 13,842 \text{ (г/м}^3\text{)};$$

- При $\varphi = 90\%$

$$\rho_v = 0,90 \cdot 23,07 = 20,763 \text{ (г/м}^3\text{)};$$

Тоді $\Delta\rho$:

$$\text{При } \varphi = 60\%: \Delta\rho = 13,842 - 9,228 = 4,614 \text{ (г/м}^3\text{)};$$

$$\text{При } \varphi = 90\%: \Delta\rho = 20,763 - 9,228 = 11,535 \text{ (г/м}^3\text{)}.$$

Розрахуємо кількість води в грамах на годину яку потрібно додавати, щоб компенсувати вентиляцію та підтримувати потрібну вологість:

При АСН = 0,5 та $\varphi = 60\%$:

$$M = 47,6 \cdot 0,5 \cdot 4,614 = 109,8 \text{ (г/год)} = 0,1098 \text{ (л/год)};$$

При АСН = 0,5 та $\varphi = 90\%$:

$$M = 47,6 \cdot 0,5 \cdot 11,535 = 274,53 \text{ (г/год)} = 0,2745 \text{ (л/год)};$$

При АСН = 1 та $\varphi = 60\%$:

$$M = 47,6 \cdot 1 \cdot 4,614 = 219,6 \text{ (г/год)} = 0,2196 \text{ (л/год)};$$

При АСН = 1 та $\varphi = 90\%$:

$$M = 47,6 \cdot 1 \cdot 11,535 = 549,06 \text{ (г/год)} = 0,549 \text{ (л/год)};$$

При АСН = 2 та $\varphi = 60\%$:

$$M = 47,6 \cdot 2 \cdot 4,614 = 439,3 \text{ (г/год)} = 0,4393 \text{ (л/год)};$$

При АСН = 2 та $\varphi = 90\%$:

$$M = 47,6 \cdot 2 \cdot 11,535 = 1098,13 \text{ (г/год)} = 1,098 \text{ (л/год)};$$

При АСН = 3 та $\varphi = 60\%$:

$$M = 47,6 \cdot 3 \cdot 4,614 = 658,8 \text{ (г/год)} = 0,6588 \text{ (л/год)};$$

При АСН = 3 та $\varphi = 90\%$:

$$M = 47,6 \cdot 3 \cdot 11,535 = 1647,19 \text{ (г/год)} = 1,647 \text{ (л/год)};$$

Розрахуємо необхідну кількість форсунок враховуючи найбільшу потребу при умовах АСН = 3 та $\varphi = 80\%$:

$$N = \frac{1,647}{9,6 \cdot 0,8} = 0,214;$$

Виходячи з розрахунку при витраті на форсунці $Q = 0,16 \text{ (л/хв)} = 9,6 \text{ (л/год)}$ для зволоження повітря в обраній теплиці вистачить менше однієї форсунки, але так як фізично використати таке число форсунок неможливо то це число округлюється до 1. З технічної точки зору використання 1 форсунки для зволоження повітря можливо, але в реальних умовах така система не буде коректно працювати так як одна форсунка створить локальну зону високої вологості та сухі зона далі від неї. Для досягнення рівномірної вологості в 60% - 90% потрібна система з кількома форсунками. Розрахуємо необхідну кількість форсунок ще раз, з урахуванням різної витрати води взятої з аналогових форсунок.

Проаналізувавши існуючі форсунки для зволоження повітря я знайшов такі стандартні значення витрата:

$$Q = 0,7 \text{ л/год};$$

$$Q = 1,8 \text{ л/год};$$

$$Q = 3 \text{ л/год};$$

Підберемо потрібне значення через формулу потрібної кількості форсунок для зволоження повітря в теплиці:

При $Q = 0,7 \text{ л/год}$:

$$N = \frac{1,647}{0,7 \cdot 0,8} = 2,94;$$

При $Q = 1,8$ л/год:

$$N = \frac{1,647}{1,8 \cdot 0,8} = 1,14;$$

При $Q = 3$ л/год:

$$N = \frac{1,647}{3 \cdot 0,8} = 0,68;$$

Після проведеного розрахунку я приймаю, що найбільш раціональне значення це $N = 2,94$ яке я округлю до $N = 3$.

Для отримання більш точної кількості форсунок зволоження повітря потрібно врахувати за який час форсунки повинні зволожити повітря. Для цього ми можемо скористатися інтегрованою формулою балансу вологості:

$$q = ACH \cdot V \cdot \frac{\Delta\rho}{1 - e^{-ACH \cdot t}},$$

де V – об'єм теплиці, ACH – повітрообмін, $\Delta\rho$ – різниця абсолютної маси пару, t – час зволоження повітря з 40% до 90%, e – число Ейлера.

$$q = 3 \cdot 47,6 \cdot \frac{11,535}{1 - 2,71828^{-3 \cdot 0,25}} = 3121,860 \text{ (г/год)} = 3,121 \text{ (л/год)};$$

Номінальна потрібна сумарна подача:

$$Q = \frac{q}{\eta},$$

де q – інтегрована формула балансу вологості, η – ефективність випаровування, тоді:

$$Q = \frac{3,121}{0,8} = 3,902 \text{ (л/год)}.$$

Тоді кількість форсунок зволоження повітря в теплиці з витратою $Q = 0,7$ л/год:

$$N = \frac{3,902}{0,7} = 5,57 \approx 6 \text{ (шт)}$$

2.2.2. Розрахунок розмірів для проектування форсунки для зволоження повітря

Після визначення необхідних значень витрати води в системі зволоження повітря та кількості форсунок, можна переходити до етапу

проектування власної конструкції форсунки. З цією метою було проведено аналіз та пошук існуючих аналогів, що дозволило глибше зрозуміти особливості та вимоги до майбутнього виробу. У результаті порівняння різних технічних рішень вибір було зупинено на форсунці зволоження повітря від компанії Lechler, яка демонструє оптимальне поєднання надійності, ефективності (Рис. 2.3).

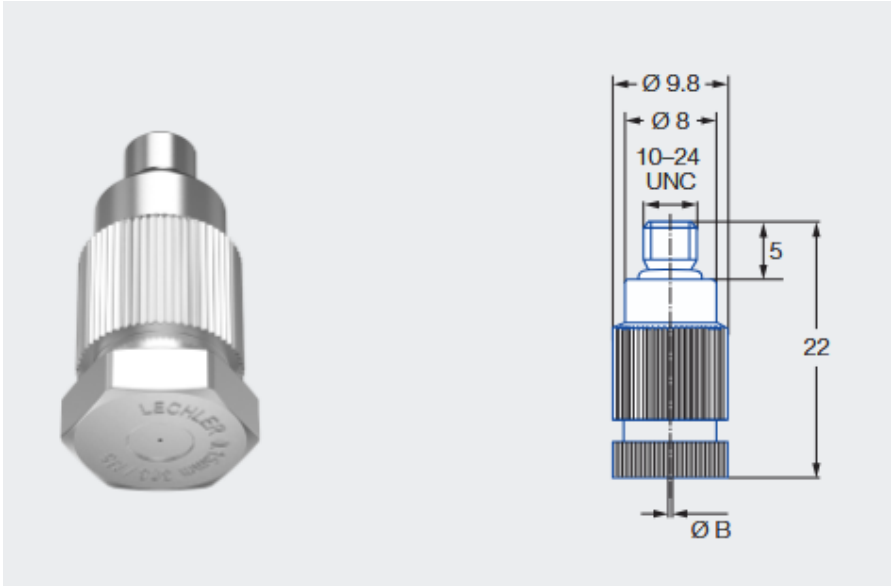


Рисунок 2.3 Форсунка зволоження повітря від компанії Lechler

Також було проаналізовано характеристика робочих параметрів (Рис 2.4).

Spray angle	Order no.		B Ø [mm]	Ṽ [l/h]							
		Stainless steel 1.4305		p [bar] (pmin = 30 bar) ¹ (pmax = 130 bar) ²							
				30	40	50	60	70	80	90	100
55°	2MN.014.16.00.00	●	0.15	1.44	2.28	2.58	2.82	3.00	3.48	3.84	4.08
70°	2MN.025.16.00.00	●	0.20	2.46	3.42	3.78	4.26	4.50	5.10	5.10	5.46
85°	2MN.055.16.00.00	●	0.30	4.20	4.92	5.46	6.12	6.30	6.96	7.32	7.92
90°	2MN.086.16.00.00	●	0.40	5.64	6.96	7.68	8.52	9.00	9.54	10.14	11.10
95°	2MN.106.16.00.00	●	0.50	7.02	8.16	9.60	10.80	11.40	11.70	12.54	13.68

Рисунок 2.4 Характеристика робочих параметрів форсунки зволоження повітря від компанії Lechler [21]

Я приймаю, що тиск в системі становить $P = 30$ бар. Такий тиск забезпечує достатню кінетичну енергію для формування дрібнодисперсного

туману. При цьому важливо підтримувати стабільність тиску в системі, оскільки відхилення можуть негативно впливати на рівномірність розміру крапель.

Тоді параметри для розрахунку розмірів для проектування форсунки для зволоження повітря:

$$Q = 0,7 \text{ (л/год)} = 1,94 \cdot 10^{-7} \text{ (м}^3\text{/сек)};$$

$$P = 30 \text{ (бар)} = 3 \cdot 10^6 \text{ (Па)}.$$

2.2.2.1 Розрахунок деталі сопла

Знаючи витрату рідини в системі та тиск, ми можемо порахувати необхідний нам діаметр сопла ($d_{\text{сопл}}$):

$$d_{\text{сопл}} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}},$$

де Q – витрата рідини; v – швидкість потоку на виході з сопла.

Швидкість потоку на виході з сопла v [37]:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}},$$

де ΔP – перепад тиску; ρ – густина води.

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 3 \cdot 10^6}{1000}} = 77 \text{ (м/с)}$$

Тоді діаметр сопла ($d_{\text{сопл}}$):

$$d_{\text{сопл}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,94 \cdot 10^{-7}}{3,14 \cdot 77}} = 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ (м)}$$

Для впевненості в розрахунковому діаметрі додатково порахуємо його через формулу витрати:

$$Q = \mu \cdot F \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}},$$

де μ - коефіцієнт витрати (0,6 – 0,8); F – площа круга; ΔP – перепад тиску; ρ – густина.

$$F = \frac{\pi \cdot d^2}{4},$$

де d – діаметр сопла, тоді отримуємо формулу:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot \mu \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,94 \cdot 10^{-7}}{3,1415 \cdot 0,6 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 3 \cdot 10^6}{1000}}}} = 7,2 \cdot 10^{-5}(\text{м})$$

Оскільки отримане розрахункове значення діаметра сопла $d = 7,2 \cdot 10^{-5}$ є надзвичайно малим і в реальних умовах форсунки з настільки малими розмірами сопла не застосовуються, було прийнято конструктивне рішення встановити діаметр сопла $d_{\text{сопл}} = 0,1$ мм. Такий розмір є технологічно досяжним, забезпечує необхідні умови роботи та відповідає параметрам існуючих промислових форсунок.

Розрахунок довжини сопла зазвичай вибирається пропорційно діаметру:

$$L = K_L \cdot d_{\text{сопл}},$$

де K_L – коефіцієнт (від 4-8), який впливає на форму розпилю.

Приймаємо, що $K_L = 4$, що дасть нам максимальний кут розпилення.

$$L = 4 \cdot 0,0001 = 0,0004 (\text{м}) = 0,4 (\text{мм})$$

Конусний перехід до сопла - кут 30-60 °, для оптимальної роботи форсунки приймаємо кут 55°.

Внутрішнього діаметра деталі «сопло»:

При проектуванні було виявлено, що оптимальний розмір внутрішнього діаметра деталі «сопло» $d = 1,5$ мм та довжина каналу $L = 6$ мм, що забезпечить стабілізацію потоку та дасть місце для ущільнення та різьби.

2.2.2.2 Розрахунок деталі «корпус форсунки»

Формула для розрахунку діаметру підводу[27]:

$$d_{\text{п}} = 4,6 \cdot \sqrt{\frac{Q_{\text{махн}}}{V_{\text{н}}}},$$

де $Q_{\text{махн}}$ – максимальна витрата на напірній лінії; $V_{\text{н}}$ – середня швидкість потоку рідини на напірній лінії.

$$d_{\pi} = 4,6 \cdot \sqrt{\frac{1,94 \cdot 10^{-7}}{3}} = 0,00116(\text{м})$$

Внутрішній діаметр основної камери корпусу форсунки визначається геометричними параметрами сопла, зокрема зовнішнім діаметром його різьбової частини ($d = 3$ мм). Таким чином, для забезпечення належної герметичності та взаємної сумісності внутрішній діаметр основної камери повинен дорівнювати цьому значенню.

Конусний перехід від підводу до основної камери корпусу форсунки - кут $30-60^\circ$, для оптимальної роботи форсунки приймаємо кут 55° .

2.2.2.3 Розрахунок зворотнього клапану

Розрахунок пружини:

Приймаємо, що для забезпечення оптимальної роботи форсунки клапан має починати відкриватися при тиску 15 бар. Для цього необхідно визначити площу поверхні напівсферичного замикаючого елемента, на який безпосередньо діє водяний тиск.

Формула площі круга:

$$F = \frac{\pi \cdot d^2}{4},$$

де d – діаметр підводу рідини, тоді отримаємо:

$$F = \frac{3,14 \cdot 0,002^2}{4} = 3,4 \cdot 10^{-6}$$

Формула для розрахунку сили тиску:

$$F_{\text{тиску}} = P \cdot F,$$

де P – тиск; F – площа, тоді отримаємо:

$$F_{\text{тиску}} = 1,5 \cdot 10^6 \cdot 3,4 \cdot 10^{-6} = 5,1 \text{ (Н)}$$

Ця сила ≈ 5 Н повинна створюватися пружиною у закритому стані щоб клапан почав підніматися лише за ~ 15 бар.

Щоб вода рівномірно проходила, напівсферичний замикаючий елемент повинен відійти від сидла на деякий хід h . Допустимо, для туманоутворюючої форсунки вистачить підйому 0,5 -1 мм. При цьому[35]:

$$k = \frac{F_{\text{тиску}}}{h},$$

Приймаємо, що для оптимальної роботи форсунки $h = 1 \text{ (мм)} = 0,001 \text{ (м)}$, тоді:

$$k = \frac{5}{0,001} = 5000 \left(\frac{\text{Н}}{\text{м}} \right)$$

Це жорсткість, яку повинна мати пружина, щоб створити близько 18 Н при стисканні на 1 мм.

Розглянемо стандартну гвинтову циліндричну пружину із нержавіючої сталі (AISI 302/304) або пружинної сталі. Формула жорсткості:

$$k = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot D^3 \cdot n},$$

де G -модуль пружності (для сталі $8 \cdot 10^{10} \text{ Па}$); d - діаметр дроту; D - середній діаметр пружини; n – кількість витків.

Приймаємо, що

$$d = 0,4 \text{ мм} = 0,0004 \text{ м};$$

$$D = 2 \text{ мм} = 0,002 \text{ м};$$

Тоді враховуючи, що $k = 5000 \text{ Н/м}$, отримаємо:

$$n = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot D^3 \cdot k}$$
$$n = \frac{8 \cdot 10^{10} \cdot 0,0004^4}{8 \cdot 0,002^3 \cdot 5000} = 6,4$$

Приймаю, що кількість витків пружини $n = 6$.

Розрахунок довжини пружини та кроку між витками

Мінімально можлива висота пружини розраховується по формулі:

$$H = n \cdot d$$

Величина n та d відома з минулих розрахунків, тоді:

$$H = 6 \cdot 0,0004 = 0,0024 \text{ (м)} = 2,4 \text{ (мм)}$$

Повна довжина пружини:

$$L = H + h,$$

де H – мінімально можлива висота пружини, h – робочий хід пружини, тоді отримаємо:

$$L = 3,5 + 0,4 = 3,9 \text{ (мм)}$$

Розрахуємо напівсферичний замикаючий елемент

З розрахунків пружини ми отримали, що її внутрішній діаметр $d = 1,6$ мм, що дорівнює діаметру посадки напівсферичного замикаючого елемента.

Зовнішній діаметр полусфери повинен перекривати повністю перекривати канал підводу води, тобто якщо діаметр підводу $d = 2$ мм то діаметр полусфери $d = 2,2$ мм, що дасть можливість перекривати зазор та дозволить вільно перетікати рідини при відкритті клапану.

Після проведення розрахунку зворотнього клапану ми можемо отримати розміри основної камери форсунки:

$$L = L_{зв} + L_{п},$$

де $L_{зв}$ – це довжина зворотного клапану; $L_{п}$ – довжина пістона, що випирає з сопла:

$$L = 9 \text{ мм}$$

Після виконання необхідних розрахунків була створена тривимірна модель форсунки для зволоження повітря в теплиці, що дозволило візуалізувати конструкцію та виконати оптимізацію її параметрів (Рис 2.5).

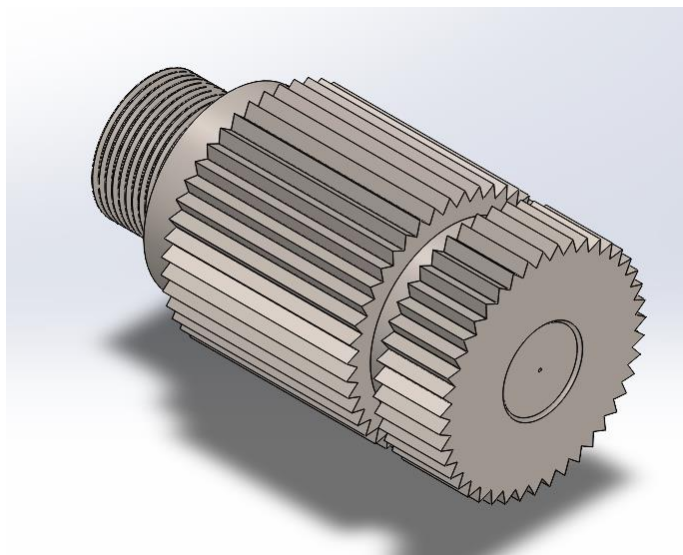


Рисунок 2.5 Тривимірний модель форсунки для зволоження повітря в теплиці.

Представлення моделі форсунки зволоження повітря в розрізі для демонстрації її внутрішніх елементів (Рис 2.6).

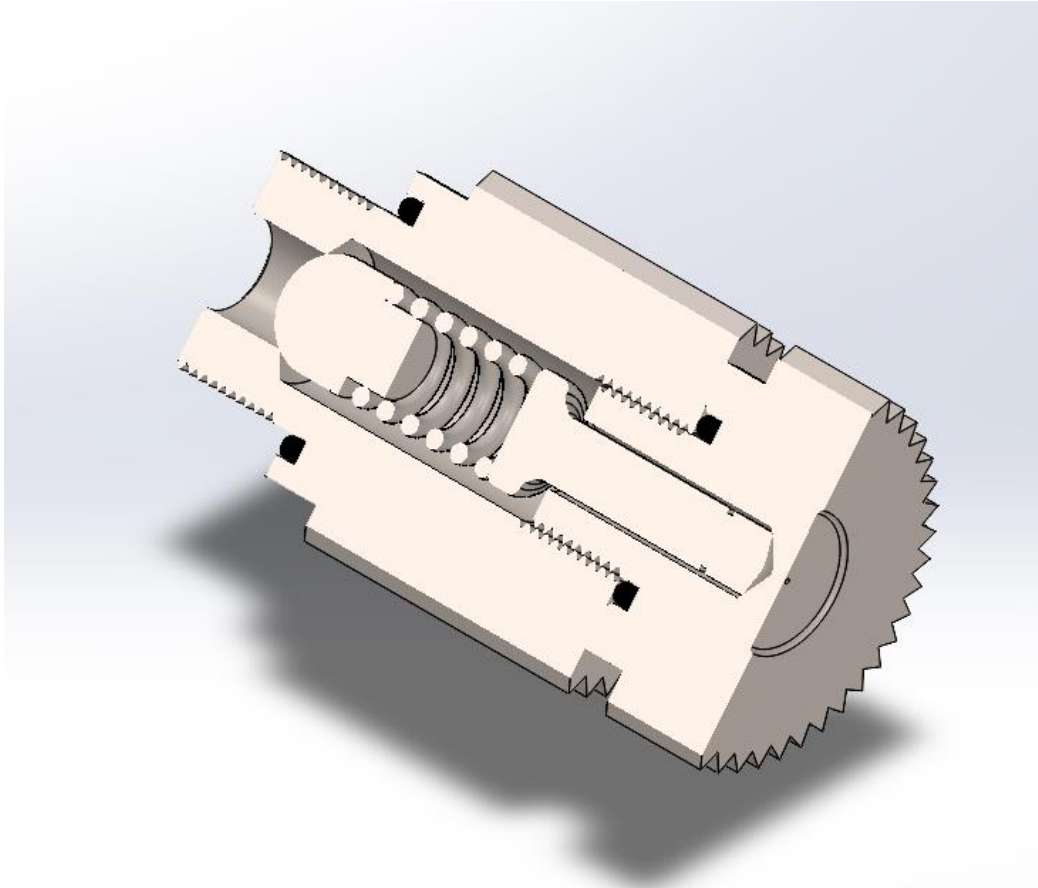


Рисунок 2.6 Представлення моделі форсунки зволоження повітря в розрізі для демонстрації її внутрішніх елементів.

2.2.3 Проектування гідравлічної системи зволоження повітря та поливу в теплиці

В своєму бакалаврському проекті мною була представлена гідравлічна схема зволоження повітря та поливу в теплиці (Рис 2.7), що об'єднувала ці дві системи в одну та живилась від однієї насосної станції.

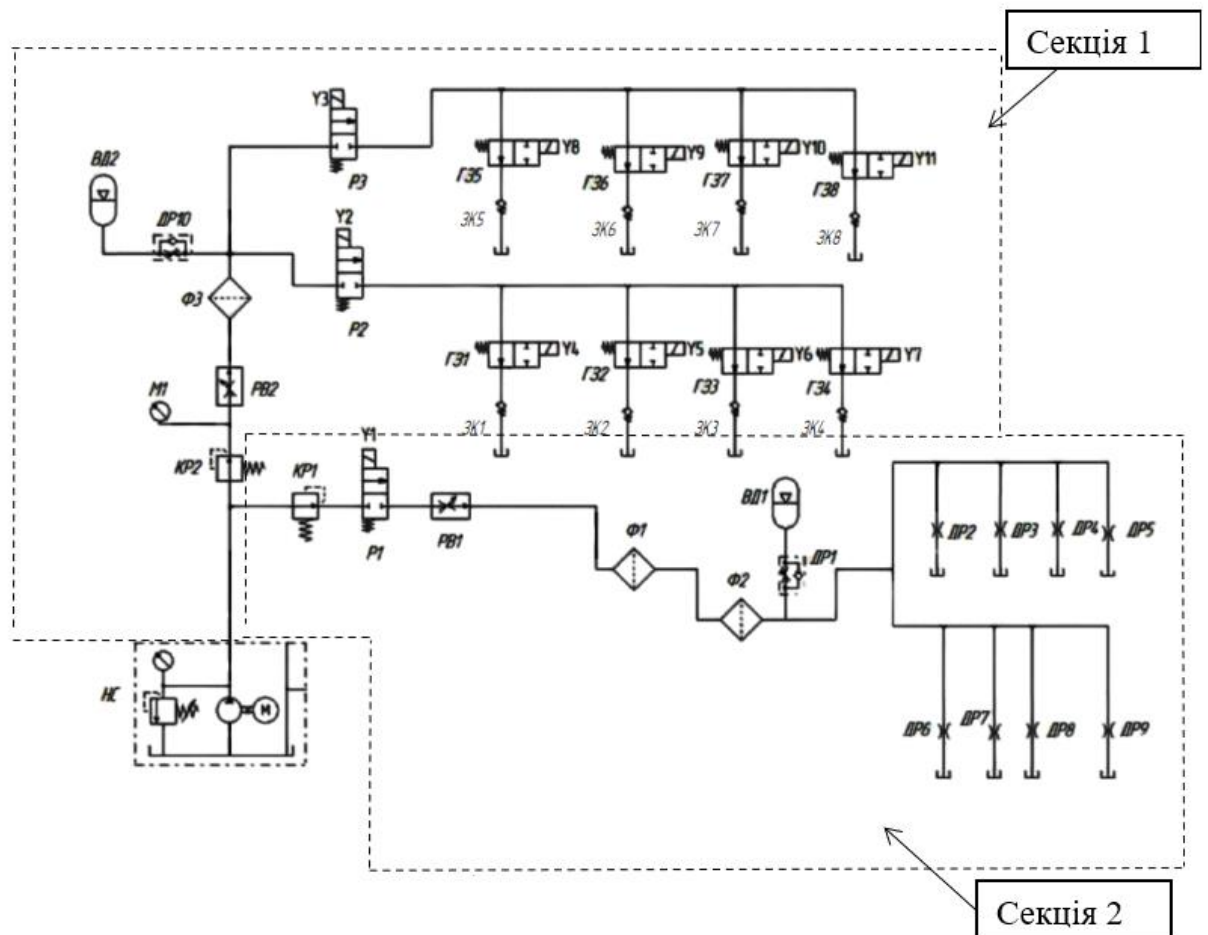


Рисунок 2.7 Принципова гідравлічна схема [22]

Опис роботи попередньої гідравлічної схеми зволоження повітря та поливу:

При увімкненні насосної станції вода подається на редукційні клапани (КР1, КР2), які налаштовані на оптимальний тиск у кожній окремій системі. Під час перемикання розподільника Р1 вода надходить у систему через регулятор витрати РВ1, що забезпечує підтримання оптимального рівня витрати в контурі краплинного поливу. Після проходження фільтрації (фільтри Ф1 та Ф2) у воду додаються добрива (внесення добрив ВД1) за допомогою інжектора типу «Вентурі». Дросель із зворотним клапаном ДР1 запобігає можливому витоку води у ємність із добривом. На схемі дроселями (ДР2–ДР9) позначені виходи з трубопроводу капілярного поливу.

Друга секція установки — система зволоження повітря — обладнана регулятором витрати РВ2, який виконує аналогічні функції, але з іншими параметрами на виході. Розподільники Р2 та Р3 забезпечують можливість

вмикання потрібної секції для зволоження. На схемі розподільники (ГЗ1–ГЗ8) позначають гідрозамки; кожен із них можна за потреби перекривати, що дозволяє зволожувати лише необхідну ділянку теплиці. Зворотними клапанами (ЗК1–ЗК8) умовно позначено форсунки, у корпусах яких ці клапани безпосередньо встановлені. Система додавання добрив ВД2 аналогічна ВД1, проте її застосування в системі зволоження є опціональним. [22]

2.2.4 Розробка нової системи зволоження повітря в теплиці

Так як я прийняв, що краще відокремити систему зволоження повітря та систему краплинного поливу в теплиці, я розроблю дві нові гідравлічні схеми, що також будуть враховувати результати минулих розрахунків, а саме кількість форсунок та інші граничні умови витрати води та тиску в системі.

Для вирішення задачі по зволоженню повітря в теплиці мною запропонована гідравлічна схема (Рис. 2.8).

2.2.5 Опис роботи системи зволоження повітря

При увімкненні насосної станції вода спочатку подається на фільтр із зворотним клапаном Ф1. Після проходження фільтрації очищена вода надходить до редукційних клапанів КР1 – КР2, які підтримують стабільний та оптимальний тиск у системі. Далі потік спрямовується через регулятори витрати РВ1 – РВ2, що забезпечують необхідну та рівномірну витрату води для коректної роботи форсунок, призначених для зволоження повітря в

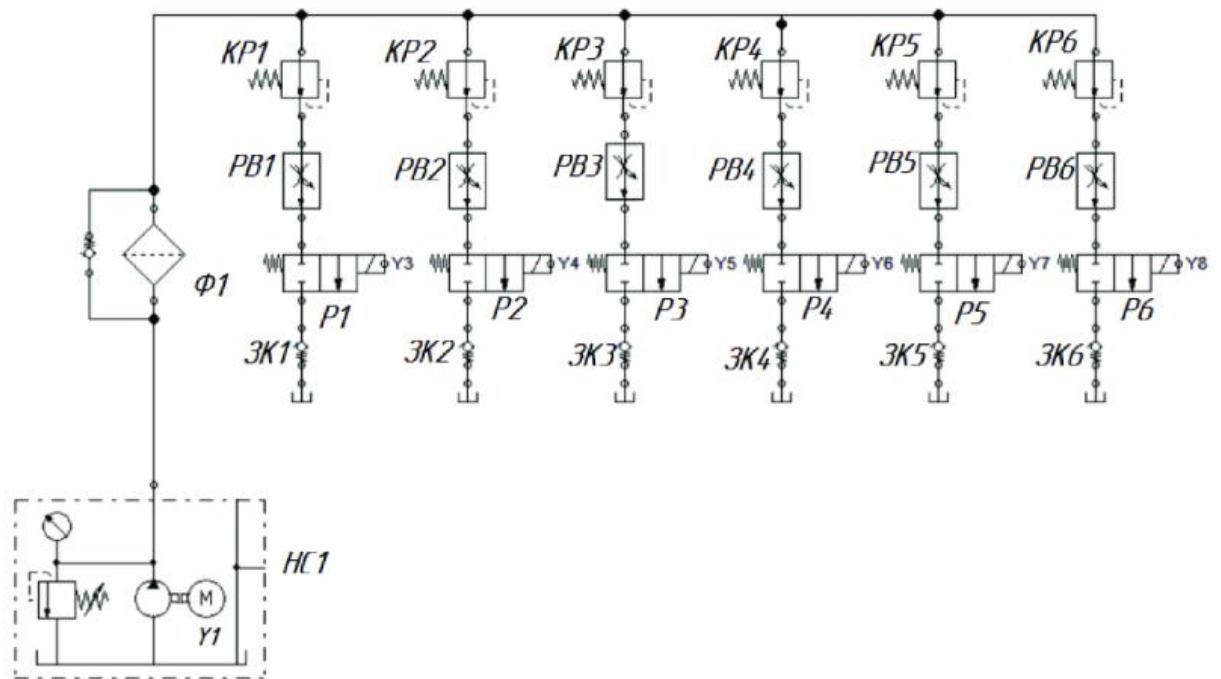


Рисунок 2.8 Принципова гідралічна схема зволоження повітря в теплиці теплиці. На схемі ці форсунки умовно позначені як зворотні клапани ЗК1 – ЗК2, оскільки відповідні клапанні механізми розташовані безпосередньо в їхньому корпусі та запобігають зворотному руху води.

Розподільники Р1 – Р6 виконують функцію селективного керування подачею води: кожен із них дає можливість окремо вмикати чи вимикати відповідну лінію зволоження. Така конструкція дає змогу ефективно регулювати мікроклімат у теплиці, зволожуючи тільки ті зони, які цього потребують у певний момент. Це підвищує гнучкість, економічність та загальну ефективність роботи системи зволоження.

2.2.6 Розрахунок трубопроводу системи зволоження повітря

Після проведених розрахунків я отримав, що витрата на одній форсунці зволоження повітря та тиск:

$$Q = 0,7 \text{ (л/год)} = 1,94 \cdot 10^{-7} \text{ (м}^3\text{/сек)};$$

$$P = 30 \text{ (бар)} = 3 \cdot 10^6 \text{ (Па)}.$$

Щоб забезпечити зволоження в теплиці потрібно використати 6 форсунок, виходячи з наявних даних витрата в системі буде, $Q = 4,2 \text{ л/год} = 1,16 \cdot 10^{-6} \text{ (м}^3\text{/сек)}$.

Вибір розмірів трубопроводів:

Модель теплиці з розташуванням труб для зволоження та насосної станції (Рис 2.9)

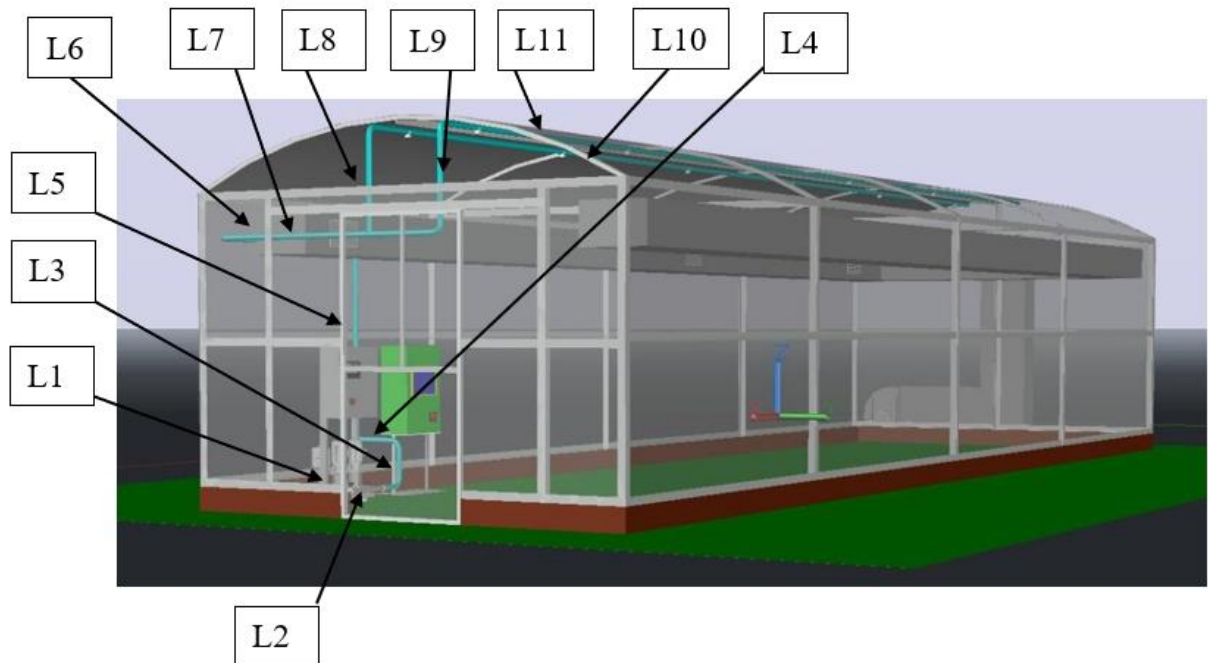


Рисунок 2.9 Розташування труб в теплиці

Назначаємо довжини трубопроводів:

- Для всмоктувального трубопроводу:

$$l_1 = 0,35 \text{ м};$$

- Для напірного трубопроводу:

$$l_2 = 0,40 \text{ м};$$

$$l_3 = 0,30 \text{ м};$$

$$l_4 = 0,35 \text{ м};$$

$$l_5 = 1,3 \text{ м};$$

$$l_6 = 1,1 \text{ м};$$

$$l_7 = 2 \text{ м};$$

$$l_8 = 0,27 \text{ м};$$

$$l_9 = 0,27 \text{ м};$$

$$l_{10} = 6,80\text{м};$$

$$l_{11} = 6,80\text{м};$$

Розрахунки слід проводити на ділянках трубопроводу, які мають однаковий рівень витрати. Кожна така ділянка включає в себе трубопровід, оснащений місцевими опорами, такими як трійники, штуцери, коліна, та інші гідроапарати.

Формула для розрахунку внутрішнього діаметру трубопроводу в теплиці:

$$d_{\text{н}} = 4,6 \cdot \sqrt{\frac{Q_{\text{мах н}}}{V_{\text{н}}}},$$

де $Q_{\text{мах н}}$ – максимальна витрата на напірній лінії, $V_{\text{н}}$ – середня швидкість потоку рідини на напірній лінії.

Середню швидкість рідини вибирають у залежності від призначення трубопроводу:

для всмоктувальних $V=1,2$ м/ с;

для зливних $V= 2$ м/ с;

для напірних $V= 3...4$ м/с.

Внутрішній діаметр трубопроводів для всмоктувальної лінії визначається за формулою:

$$d_{\text{н}} = 4,6 \cdot \sqrt{\frac{Q_{\text{мах н}}}{V_{\text{н}}}} = 4,6 \cdot \sqrt{\frac{1,16 \cdot 10^{-6}}{1,2}} = 0,004 \text{ (м)}.$$

Згідно ГОСТ 14162-79 приймаємо $d_{\text{н}} = 4$ мм.

Внутрішній діаметр трубопроводів для напірної лінії визначається за формулою:

$$d_{\text{н}} = 4,6 \cdot \sqrt{\frac{Q_{\text{мах н}}}{V_{\text{н}}}} = 4,6 \cdot \sqrt{\frac{1,16 \cdot 10^{-6}}{3,1}} = 0,002 \text{ (м)}.$$

Згідно ГОСТ 14162-79 приймаємо $d_{\text{н}} = 2$ мм.

За прийнятим діаметром визначаємо дійсну швидкість руху рідини в трубопроводі:

Всмоктувальний:

$$V_B = 4 \cdot Q / \pi \cdot d_m^2 = \frac{4 \cdot 1,16 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 0,004^2} = 0,09 \quad \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Напірний:

$$V_H = 4 \cdot \frac{Q}{\pi} \cdot d_m^2 = \frac{4 \cdot 1,16 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 0,002^2} = 0,36 \quad \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

2.2.6.1 Визначення втрат по довжині трубопроводу

Гідравлічні втрати в гідросистемі складається з трьох частин:

- Втрати на гідравлічне тертя Δp_T ;
- Втрати на місцевих опорах Δp_M ;
- Втрати у гідроапартах Δp_d .

2.2.6.2 Втрати тиску на тертя

$$\Delta p_T = (0,5 \rho L \lambda V^2) / d_T,$$

де ρ - густина ; λ - коефіцієнт тертя; L- довжина ділянки; d_T - діаметр труби або шланга, V- середня швидкість рідини.

Коефіцієнт тертя λ залежить від режиму руху рідини й визначається по числу Рейнольдса :

$$Re = Vd / \nu,$$

де: V – швидкість потоку рідини; d – внутрішній діаметр трубопроводу;
 ν - кінематична в'язкість рідини;

При ламінарному русі рідини ($Re < 2320$).

З огляду на можливості звуження й скривлення перетину труби при практичних розрахунках приймають:

$$\lambda = 75 / Re.$$

При турбулентному русі ($Re \geq 2320$) коефіцієнт тертя λ залежить від числа Рейнольдса й від відносної шорсткості стінок каналу. Сталеві труби мають шорсткість $\Delta = 0,03\text{мм}$.

- Вирахуємо втрати на гідравлічне тертя на всмоктувальній лінії ($l=0,35\text{м}$)

$$\Delta p_T = \frac{0,5 \cdot 1000 \cdot 0,35 \cdot 0,2 \cdot 0,09^2}{0,004} = 70,8 \text{ (Па)},$$

де число Рейнольда $Re = \frac{0,09 \cdot 0,004}{1,004 \cdot 10^{-6}} = 358 < 2320$ - ламінарний режим руху;

Коефіцієнт гідравлічного тертя з урахуванням місцевого опору:

$$\lambda = \frac{75}{358} = 0,2;$$

- Вирахуємо втрати на гідравлічне тертя на напірній лінії ($l = 19,6\text{м}$)

$$\Delta p_T = \frac{0,5 \cdot 1000 \cdot 19,6 \cdot 0,10 \cdot 0,36^2}{0,002} = 63504 \text{ Па},$$

де коефіцієнт Рейнольда $Re = \frac{0,36 \cdot 0,002}{1,004 \cdot 10^{-6}} = 717 < 2320$ - ламінарний режим

Коефіцієнт коефіцієнт гідравлічного тертя з урахуванням місцевого опору:

$$\lambda = \frac{75}{717} = 0,10.$$

Результати розрахунків наведені в таблиці 2.1

Таблиця 2.1

Результат розрахунок втрат на тертя по довжині:

Номер ділянки	L, М	d, мм	Q, л/хв.	V, м/с	Re	λ	Δp_T , Па
1	0,35	4	1,28	0,09	358	0,15	70,8
2	19,6	2	1,28	0,36	717	0,07	63504

Загальні втрати на кожній секції розрахуємо, як суму окремих втрат:

$$\Delta p_T = 70,8 + 63504 = 63\,575 \text{ Па}.$$

2.2.6.3 Втрати на місцевих опорах:

Втрати на місцевих опорах визначимо за формулою:

$$\Delta p_M = 0,5 \rho \xi V^2,$$

де ξ - коефіцієнт місцевого опору.

Місцевими втратами на лінії всмоктування є:

- Вхід у фільтр $\xi = 0,9$.
- Вихід з фільтру $\xi = 0,7$.

Отже маємо:

$$\Delta p_M = (0,5 \cdot 1000 \cdot 0,9 \cdot 0,09^2) + (0,5 \cdot 1000 \cdot 0,7 \cdot 0,09^2) = 7 \text{ Па.}$$

Місцевими втратами на лінії нагнітання є:

- Вхід у розподільник $\xi = 0,9$.
- Вихід з розподільника $\xi = 0,7$.
- Трійник $\xi = 2,5$ (7 штуки).
- Редукційний клапан $\xi = 2,2$ (6 штуки).
- Регулятор витрати $\xi = 2$ (6 штуки).
- Вхід у фільтр $\xi = 0,9$.
- Вихід з фільтру $\xi = 0,7$.
- Коліно закруглене $\xi = 0,15$ (6 штуки).
- Запірний клапан $\xi = 2$ (6 штук).

Втрати на розподільнику:

$$\Delta p_M = (0,5 \cdot 1000 \cdot 0,9 \cdot 0,36^2) + (0,5 \cdot 1000 \cdot 0,7 \cdot 0,36^2) = 104 \text{ Па.}$$

Так як в системі встановлено шість розподільника сумарна втрата

$$\Delta p_M = 104 \cdot 6 = 624 \text{ Па.}$$

Втрати на трійниках:

$$\Delta p_M = (0,5 \cdot 1000 \cdot (2,5 \cdot 7) \cdot 0,36^2) = 1134 \text{ Па.}$$

Втрати на редукційному клапані:

$$\Delta p_M = (0,5 \cdot 1000 \cdot (2,2 \cdot 6) \cdot 0,36^2) = 856 \text{ Па.}$$

Втрати на регуляторі витрати:

$$\Delta p_M = (0,5 \cdot 1000 \cdot (2 \cdot 6) \cdot 0,36^2) = 778 \text{ Па.}$$

Втрати на фільтрі:

$$\Delta p_M = (0,5 \cdot 1000 \cdot 0,9 \cdot 0,36^2) + (0,5 \cdot 1000 \cdot 0,7 \cdot 0,36^2) = 104 \text{ Па.}$$

Втрати на коліно закруглене:

$$\Delta p_M = (0,5 \cdot 1000 \cdot (0,15 \cdot 6) \cdot 0,36^2) = 59 \text{ Па.}$$

Втрати на запірному клапані:

$$\Delta p_M = (0,5 \cdot 1000 \cdot (2 \cdot 6) \cdot 0,36^2) = 778 \text{ Па.}$$

Загальні втрати на кожній секції розрахуємо, як суму окремих втрат:

$$\Delta p_M = 624 + 1134 + 856 + 778 + 104 + 59 + 778 = 4333 \text{ Па.}$$

Результати розрахунків заносу у таблицю 2.2

Таблиця 2.2

Результат розрахунок втрат на місцевих опорах:

Вид опору	Кількість	ξ	Δp_M , Па
Трійник	7	2,5	1134
Фільтр	1	1,6	104
Розподільник	6	1,6	624
Редукційний клапан	6	2,2	856
Регулятор витрати	6	2	778
Коліно закруглене	6	0,15	59
Запірний клапан	6	2	778

Загальні втрати на кожній секції розрахуємо, як суму окремих втрат:

$$\Delta p_M = 4\,333 \text{ Па.}$$

2.2.6.4 Розрахунок втрат на гідроапаратах

Для розрахунку втрат треба підібрати більшу частину обладнання гідросистеми та взяти значення втрат з каталогів.

- Втрати на регуляторі витрати Bronkhorst ES-112C [23]:

З характеристики регулятора витрати $\Delta p_d = 0,03$ МПа, так як в системі встановлюється шість регуляторів витрати то загальна втрата буде $\Delta p_d = 0,18$ МПа.

- Втрати на промивному фільтрі FOGCO 10 Filter Housing [24]

З характеристики фільтра $\Delta p_d = 0,001$ МПа.

- Втрати на розподільнику HP20 1/4 inch 230V 12V 24V [25]:

З характеристики розподільника $\Delta p_d = 0,009$ МПа, так як в системі встановлюється шість розподільників то загальна втрата буде $\Delta p_d = 0,054$ МПа.

- Втрати на редукційному клапані TESCOМ 22-5400 Series Electropolished Pressure Regulator [26]:

З характеристики фільтра $\Delta p_d = 0,001$ МПа, так як в системі встановлюється шість редукторів тиску то загальна втрата буде $\Delta p_d = 0,006$ МПа.

Вид опору	Кількість	Δp_d , МПа	Загальна Δp_d , МПа
Розподільник HP20	6	0,009	0,054
Редукційний клапан TESCOМ	6	0,001	0,006
Регулятор витрати Bronkhorst	6	0,03	0,18
Фільтр FOGCO	1	0,001	0,001

Загальні втрати на кожній секції розрахуємо, як суму окремих втрат:

$$\Delta p_m = 241000 \text{ Па.}$$

Загальні втрати в системі зволоження повітря:

- Загальні втрати на гідравлічне тертя $\Delta p_T = 63\,575$ Па;
- Загальні втрати на місцевих опорах $\Delta p_M = 4\,333$ Па;
- Загальні втрати у гідроапартах $\Delta p_d = 241000$ Па;

$$\Delta p_3 = 308\,908 \text{ Па.}$$

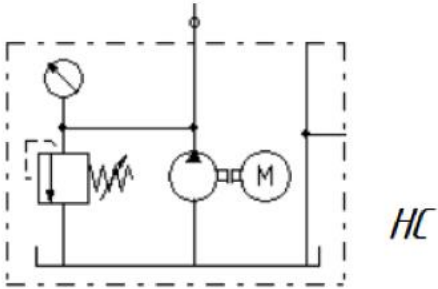
2.2.7 Підбір гідравлічного обладнання для системи зволоження повітря

В цьому розділі я підберу потрібні гідроапарати для реалізації системи зволоження повітря в телиці. На зображеннях буде показано реальний вигляд апарату та його позначення на схемі.

Насосної станції від компанії aerMist модель 050SA (Рис 2.10):

Рисунок 2.10 Насосна станція aerMist 050SA [27]

Характеристика насосної станції:



Параметр	Значення
Живлення	120VAC 60Hz 150W
Максимальний потік	0.18 GPM
Мінімальний потік	0.05 GPM
Тиск	580, 800 та 1000 PSI (вибирається користувачем)
Режими інтервального зволоження	безперервно; туман 3 сек – пауза 10 сек; туман 10 сек – пауза 10 сек; туман 20 сек – пауза 10 сек
Габарити	15 дюймів (Д) × 8 дюймів (Ш) × 8 дюймів (В)
Робоча температура насоса	40°F–130°F

Температура зберігання насоса	34°F–130°F
Рівень шуму	48 dB
Підключення води	різьба садового шланга 3/4"
Діапазон бездротового зв'язку	до 100 футів на відкритому просторі
Батарея для пульта	2 × CR2016

Фільтр FOGCO 10 Filter Housing (Рис 2.11):

Характеристика фільтра:

Вага: 1,3 кг;

Розміри: 33 × 17 × 17 см.



Рисунок 2.11 Фільтр FOGCO 10 Filter Housing [24]

Редукційний клапан TESCOM™ 22-5400 Series Electropolished Pressure Regulator (Рис 2.12)



Рисунок 2.12 Редукційний клапан TESCOM [26]

Характеристика клапана:

Максимальний тиск на вході	41,5 бар
Максимальний тиск на виході	35 бар
Матеріал	нержавіюча сталь 316
Робоча температура	від -40°C до 71°C
Пропускна здатність	1 Cv
Вага	1,6 кг

Регулятор витрати Bronkhorst ES-112C (Рис 2.13)

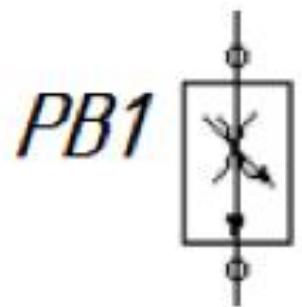


Рисунок 2.13 Регулятор витрати Bronkhorst ES-112C

Характеристика регулятора витрати:

Тип середовища	Рідини зі швидкістю звуку 1000...2000 м/с
Діапазон витрати	Рідина: 0...200 мл/хв (номінальна витрата: 75 мл/хв або 4,5 л/год)
Значення повної шкали (FS)	Налаштовується користувачем (20...200 мл/хв)
Робоча температура	0...60 °C
Температура рідини	-10...60 °C
Монтаж	У будь-якому положенні
Номінальний тиск (PN)	100
Матеріал змочених частин	Нержавіюча сталь 316L (1.4404)
Матеріал корпусу	Алюміній EN AW-6082-T6/ 3.2315
Внутрішній діаметр датчика	Пряма трубка, 0,6 мм

Розподільник Електромагнітний клапан високого тиску HP20 1/4 дюйма
230V 12V 24V (Рис 2.14)

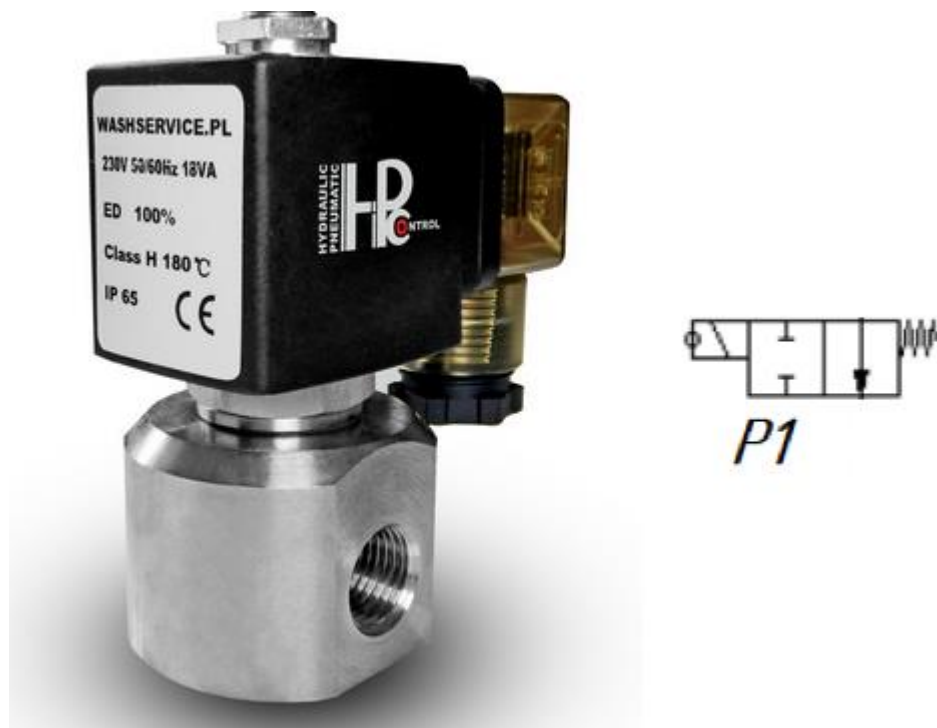


Рисунок 2.14 Електромагнітний клапан високого тиску HP20

Характеристика розподільника НР20:

Категорія	Параметр	Значення
Мембрана	Тип	Viton
	Робоча температура	-10...+140 °C
Тиск	Діапазон	0 - 55 бар
	Максимальний тиск	55 бар
Електричні характеристики	Закритий безструму	Нормально закритий
Підключення	Тип підключення	Внутрішня різьба 1/4"
Матеріали	Корпус	Нержавіюча сталь SS316
	Елементи всередині	Нержавіюча сталь
Механічні характеристики	Отвір	2 мм

2.2.8 Розробка нової системи краплинного поливу в теплиці

В рамках цього проекту важливо врахувати, що самостійна розробка та повне складання системи капілярного поливу «з нуля» не має практичного сенсу. По суті система капілярного поливу збирається або на основі насоса, який подає воду по капілярних трубках, або на основі резервуара, звідки воду подає електромагнітний клапан. Тому окреме проектування складного обладнання не потрібно: достатньо підібрати насос з необхідними параметрами або вибрати клапан, який відкриватиметься та закриватиметься за командою контролера.

Такий підхід дозволяє спростити конструкцію, знизити вартість та підвищити надійність роботи. Крім того, використання готових насосів та клапанів, які вже мають паспортні характеристики та розраховані для тривалої експлуатації, робить систему більш передбачуваною та зручною в обслуговуванні. У результаті ключова робота зводиться до вибору обладнання та його правильної інтеграції у загальну систему автоматизованого капілярного поливу.

У своїй роботі я використовую систему крапельного поливу Esotec Solar Irrigation Set (Рис 2.15), оскільки вона є однією з найбільш зручних, простих у монтажі та економічно вигідних для невеликих теплиць і локальних ділянок. Основною перевагою цього комплекту є його автономність: система працює від сонячної панелі, що дозволяє організувати полив без підключення до електромережі та без додаткових витрат на енергоспоживання. Це робить її особливо корисною для теплиць, що розташовані на віддалених ділянках або в умовах, де немає стабільного електроживлення.

Ще однією перевагою є простота монтажу. Всі компоненти системи — від контролера до шлангів і крапельниць — легко встановлюються без спеціальних інструментів і можуть бути швидко адаптовані під конкретну конфігурацію теплиці. Наявність фільтра, поплавкового вимикача та зворотного клапана робить систему надійною та дозволяє мінімізувати ризики засмічень або некоректної роботи. Управління поливом здійснюється автоматично, відповідно до заданих інтервалів, що значно спрощує процес догляду за рослинами.

Окремо варто зазначити, що у випадку, якщо одного комплекту Esotec Solar Irrigation Set недостатньо для покриття всієї площі теплиці чи кількості рослин, передбачена можливість встановлення кількох таких станцій одночасно. Системи не заважають одна одній, працюють автономно, а при необхідності їх можна синхронізувати за режимом роботи. Така модульність дозволяє масштабувати поливну систему відповідно до реальних потреб господарства.

Завдяки своїй гнучкості, простоті експлуатації та можливості автоматизації, система Esotec Solar Irrigation Set є оптимальним рішенням для створення ефективного автоматизованого поливу у теплиці. Використання цієї технології не лише зменшує трудовитрати, а й забезпечує стабільну подачу води рослинам, підвищуючи загальну ефективність вирощування та якість агротехнічного процесу.



Рисунок 2.15 Система автоматичного крапельного поливу Esotec Solar Irrigation Set [28]

Окрім вибору самої системи, у роботі також була розроблена докладна схема функціонування Esotec Solar Irrigation Set (Рис. 2.16), що дозволяє наочно продемонструвати принцип її роботи та взаємодію всіх елементів. Система складається з водяної бочки, поплавкового вимикача, фільтра, прозорого та чорного шлангів, зворотного клапана, сонячного модуля, блоку управління та лінії крапельниць. На схемі чітко показано, як кожен компонент під'єднаний і яку роль він відіграє у процесі автоматизованого поливу.

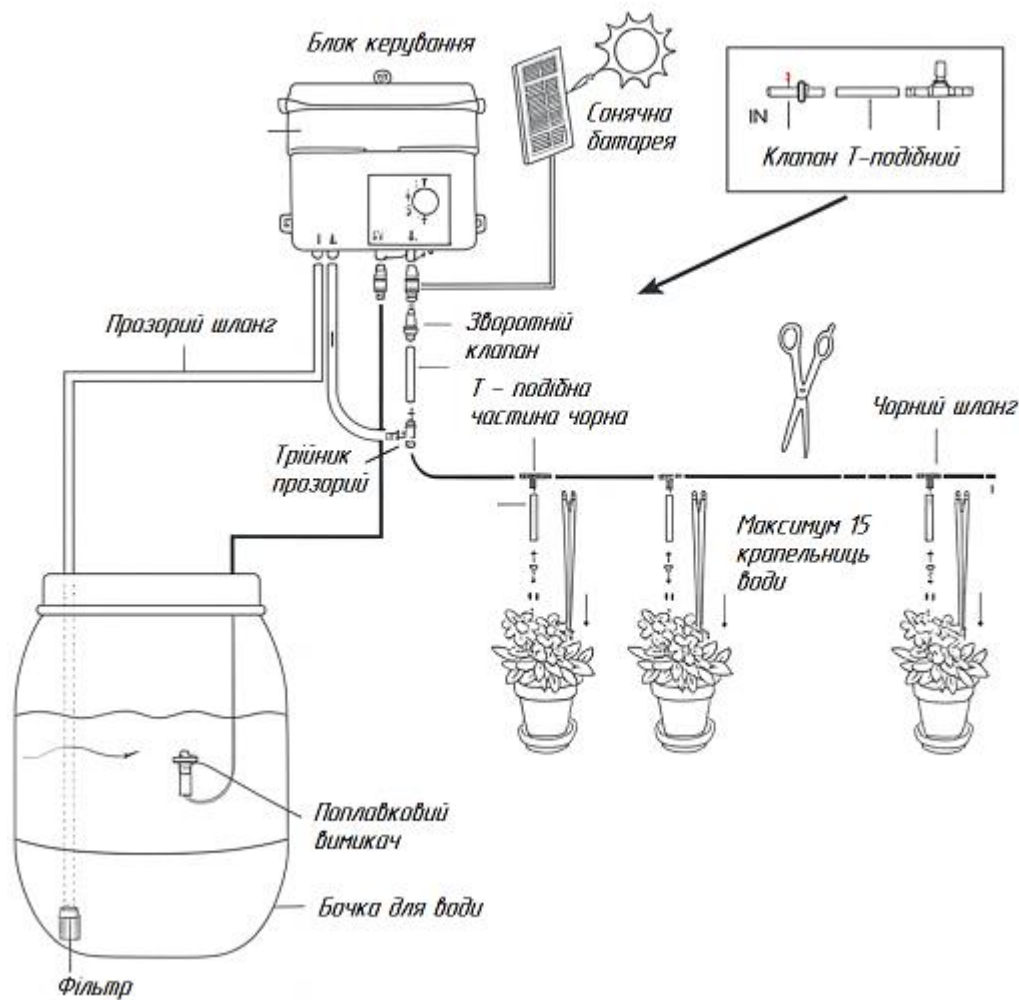


Рисунок 2.15 Схема роботи автоматичного крапельного поливу Esotec Solar Irrigation Set

Принцип роботи цієї схеми є наступним: вода з резервуара (бочки) через фільтр та прозорий всмоктувальний шланг подається до блока управління. У середині бочки встановлений поплавковий вимикач, який контролює рівень води та блокує роботу системи, якщо резервуар спорожнів, тим самим запобігаючи роботі «всуху». Далі вода проходить через зворотний клапан, який не дозволяє їй повертатися назад у шланги, забезпечуючи стабільний тиск у лінії.

Блок управління, живлений від сонячного модуля, відкриває подачу води відповідно до запрограмованого інтервалу поливу. Після цього вода рухається по чорному шлангу до магістралі, де за допомогою трійників розподіляється на окремі гілки. На кожній гілці встановлені крапельниці, що забезпечують рівномірне зволоження до 15 рослин одночасно. Такий підхід

забезпечує точне дозування води до кореневої зони, що є ключовою перевагою капельного поливу.

Таким чином, робота системи є повністю автоматизованою: сонячний модуль заряджає блок управління, контролер запускає подачу води у визначений час, фільтр та клапани гарантують стабільний потік, а крапельниці рівномірно подають воду кожній рослині. Схема дозволяє чітко зрозуміти, як узгоджено працюють усі елементи, та наочно демонструє простоту і ефективність експлуатації системи Esotec Solar Irrigation Set у теплиці.

2.3 Симуляція роботи форсунки для системи зволоження повітря в теплиці

У межах даної роботи була розроблена конструкція туманоутворювальної форсунки, призначеної для системи зволоження повітря в тепличному приміщенні. Для оцінки її працездатності, надійності та ефективності розпилення було заплановано проведення комплексного комп'ютерного моделювання. На першому етапі передбачається виконання гідродинамічної симуляції внутрішнього потоку форсунки в середовищі SolidWorks Flow Simulation. Такий аналіз дозволяє дослідити характер руху води всередині форсунки, розподіл тиску та швидкості, потенційні турбулентні зони та гідравлічні втрати. Оскільки геометрія внутрішніх каналів визначає якість формування туману, цей етап є ключовим для перевірки коректності конструкції.

Окремо в SolidWorks буде проведено і міцнісний аналіз конструкції форсунки за допомогою модуля SolidWorks Simulation. У цьому дослідженні на сопло буде накладено внутрішній тиск у 30 бар, що відповідає реальним умовам експлуатації системи високотискового туманоутворення. Метою цього етапу є визначення напружень, деформацій та коефіцієнтів запасу міцності, що дозволяє оцінити, чи витримує запропонована конструкція такі робочі умови та чи необхідна її оптимізація.

Після завершення внутрішнього аналізу та перевірки міцності буде виконаний другий етап дослідження — моделювання процесу розпилення в програмному середовищі ANSYS Fluent. У цьому середовищі буде

проаналізовано формування туманової хмари при виході води з форсунки, розподіл розмірів крапель, їх траєкторії в повітрі та рівномірність зволоження в об'ємі теплиці. Це дозволить визначити ефективність роботи форсунки під час реальної експлуатації.

Поєднання трьох напрямів аналізу — внутрішньої гідродинаміки, міцнісного розрахунку та зовнішнього моделювання розпилення — забезпечує комплексне дослідження розробленої форсунки. Такий підхід дозволяє не лише підтвердити її надійність, а й оптимізувати конструкцію перед впровадженням у систему мікроклімату тепличного господарства.

2.3.1 Гідродинамічна симуляція внутрішнього потоку форсунки в середовищі SolidWorks Flow Simulation

Для проведення симуляції була створена тривимірна модель форсунки з повністю відкритим клапаном, тобто у її робочому положенні (Рис. 2.16).

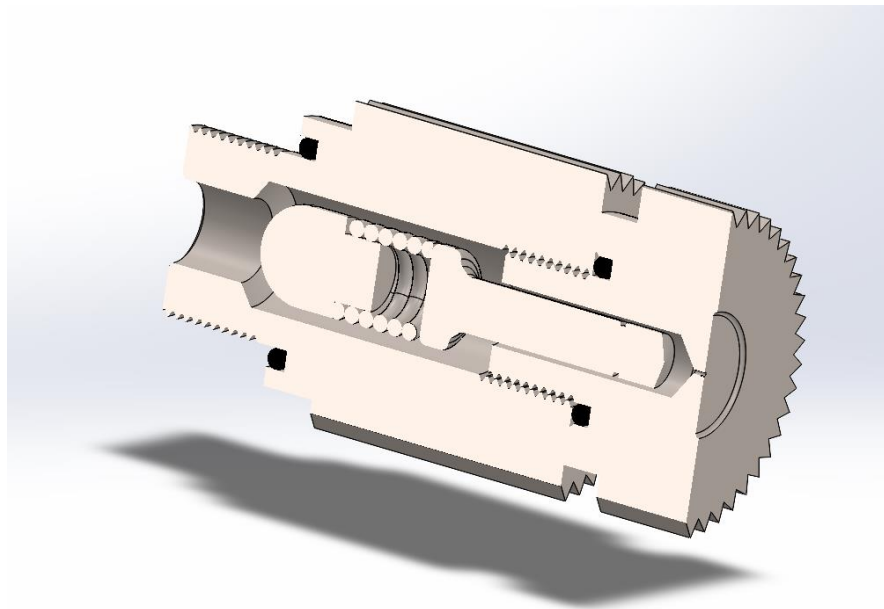


Рисунок 2.16 Форсунка з повністю відкритим клапаном

Проте виконання високоточної CFD-симуляції внутрішнього перетікання рідини виявилось неможливим для даної початкової геометрії 1, оскільки форсунка має велику кількість незамкнених контурів, дрібних елементів та складних поверхонь 2, що призводить до того, що програма не може вирахувати внутрішній об'єм, який буде заповнений водою 3. Подібні особливості ускладнюють автоматичне формування розрахункової області та

створення коректної сітки, що призводить до появи численних топологічних помилок (Рис 2.17).

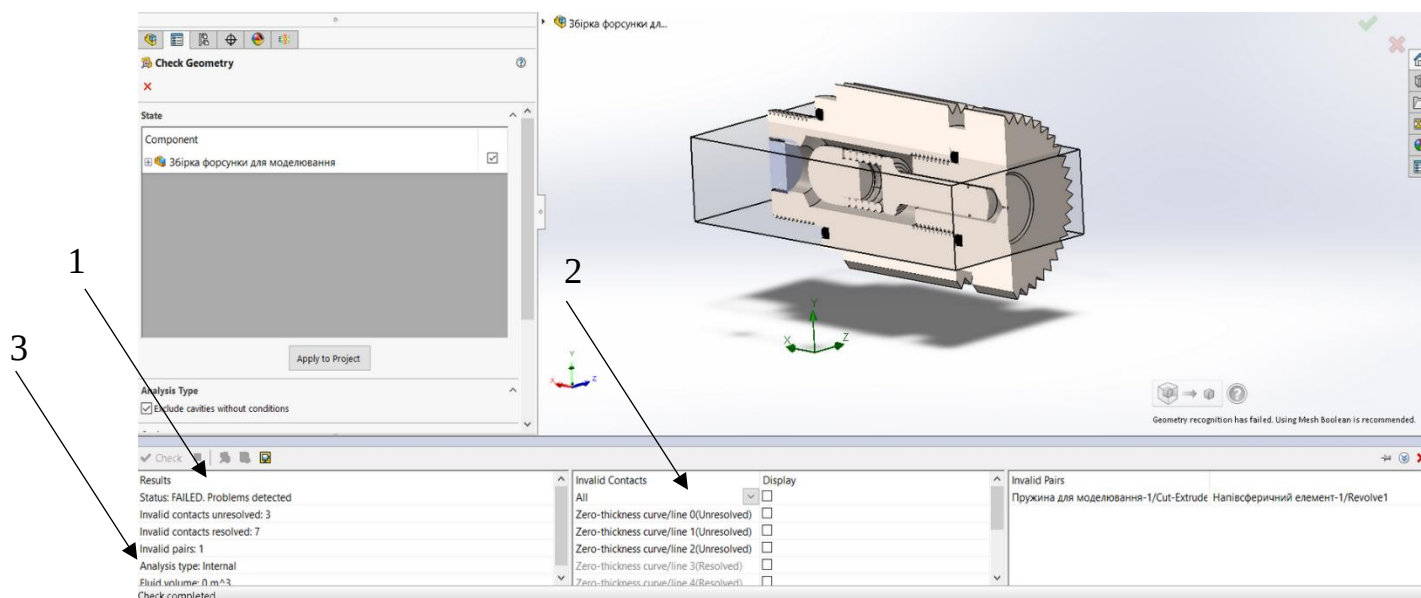


Рисунок 2.17 Перевірка геометрії в SolidWorks Flow Simulation

З огляду на це було прийнято рішення розробити спрощену 3D-модель внутрішніх каналів форсунки, яка відтворює лише гідравлічно значущі елементи потоку, але позбавлена дрібних конструктивних деталей, неважливих для моделювання. Такий підхід дозволяє отримати стабільну, замкнену й придатну до розрахунку геометрію, що забезпечує проведення точного чисельного аналізу руху рідини (Рис. 2.18).

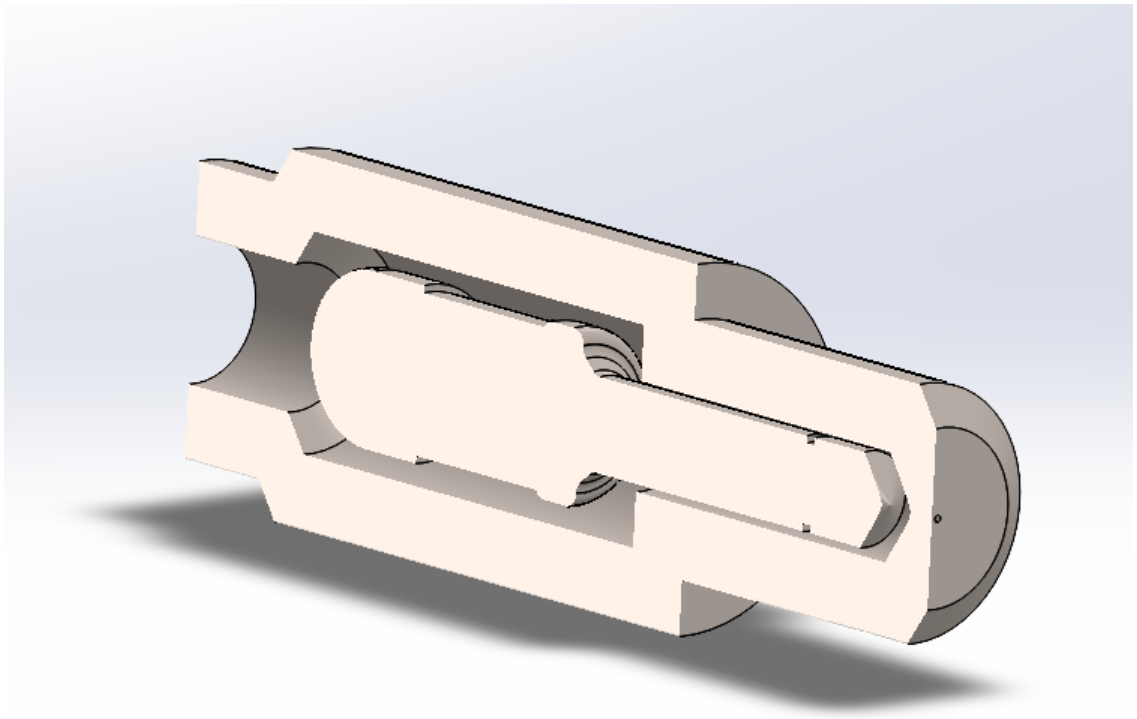


Рисунок 2.18 Спрощену 3D-модель внутрішніх каналів форсунки

Задавшись граничними умовами отриманих при розрахунках теплиці:

$$Q = 0,7 \text{ л/год} = 1,94 \cdot 10^{-7} \text{ (м}^3\text{/сек)};$$

$$P = 30 \text{ (бар)} = 3 \cdot 10^6 \text{ (Па)}.$$

Отримуємо такі епюри розподілу швидкостей в форсунці (Рис 2.19):

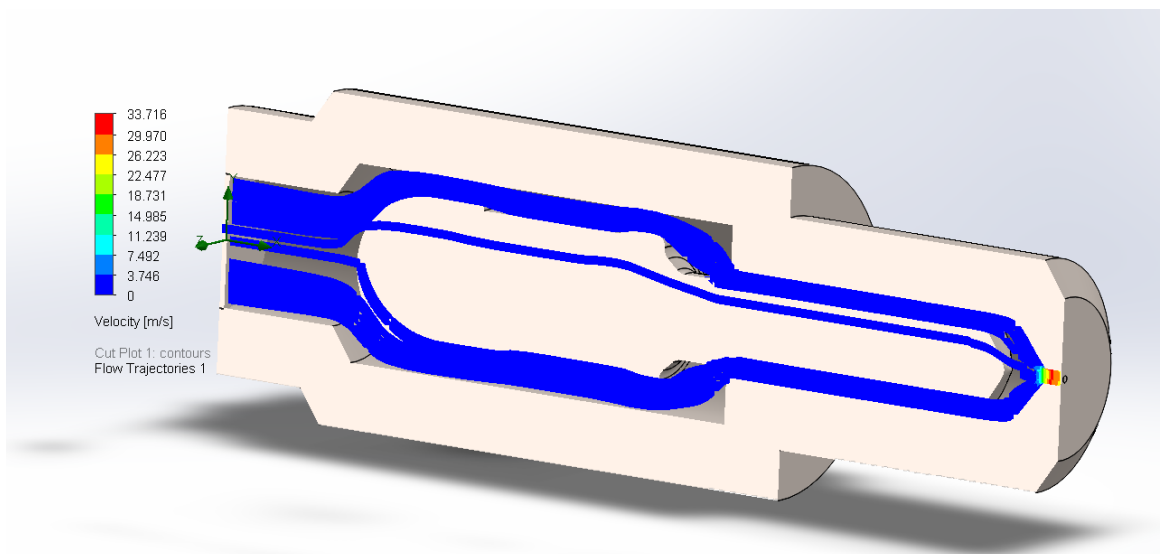


Рисунок 2.19 Розподіл швидкостей в форсунці

З отриманих епюр розподілу швидкостей можна спостерігати, що під час проходження води через внутрішні канали форсунки її швидкість не перевищує 3 м/с, що відповідає розрахунковим умовам та свідчить про

стабільний режим течії. Траєкторія руху рідини є рівномірною та сталою: у потоці не виникає інтенсивних зон завихрень, локальних перешкод чи різких перепадів швидкості, які могли б спричинити додаткові гідравлічні втрати або погіршити якість формування туману, окрім зони 1 (Рис 2.20). Така картина підтверджує оптимальність внутрішньої геометрії форсунки для забезпечення ефективного та рівномірного розпилення.

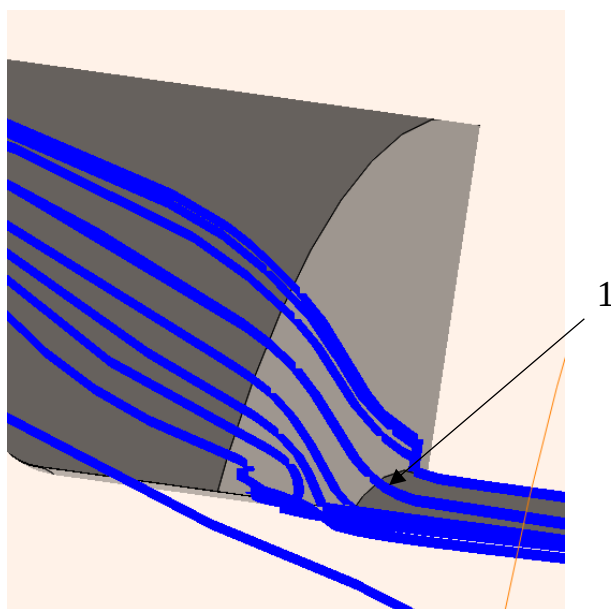


Рисунок 2.20 Зона виникнення завихрень та локального опору

При переході від корпусу форсунки до деталі сопла спостерігається різка зміна діаметра та наявність прямого кута на вході каналу. Така геометрія формує підвищений локальний гідравлічний опір, що, у свою чергу, сприяє виникненню зон завихрень і нерівномірного розподілу швидкостей у потоці. Подібні ефекти можуть негативно впливати на стабільність роботи форсунки та якість формування туману. Виявлені особливості необхідно врахувати під час подальшої оптимізації конструкції та виконання майбутніх моделювань.

У зоні розпилення, сформованій геометрією деталі сопла, спостерігається різке підвищення швидкості потоку – до 33 м/с. Такий стрибок швидкості є очікуваним та характерним для форсунок, призначених для створення дрібнодисперсного туману у системах зволоження повітря. Саме висока швидкість на виході забезпечує інтенсивне дроблення рідини на дрібні

краплі та формування стабільної туманової хмари (Рис. 2.21). Отримані результати підтверджують коректність роботи сопла в умовах заданого тиску.

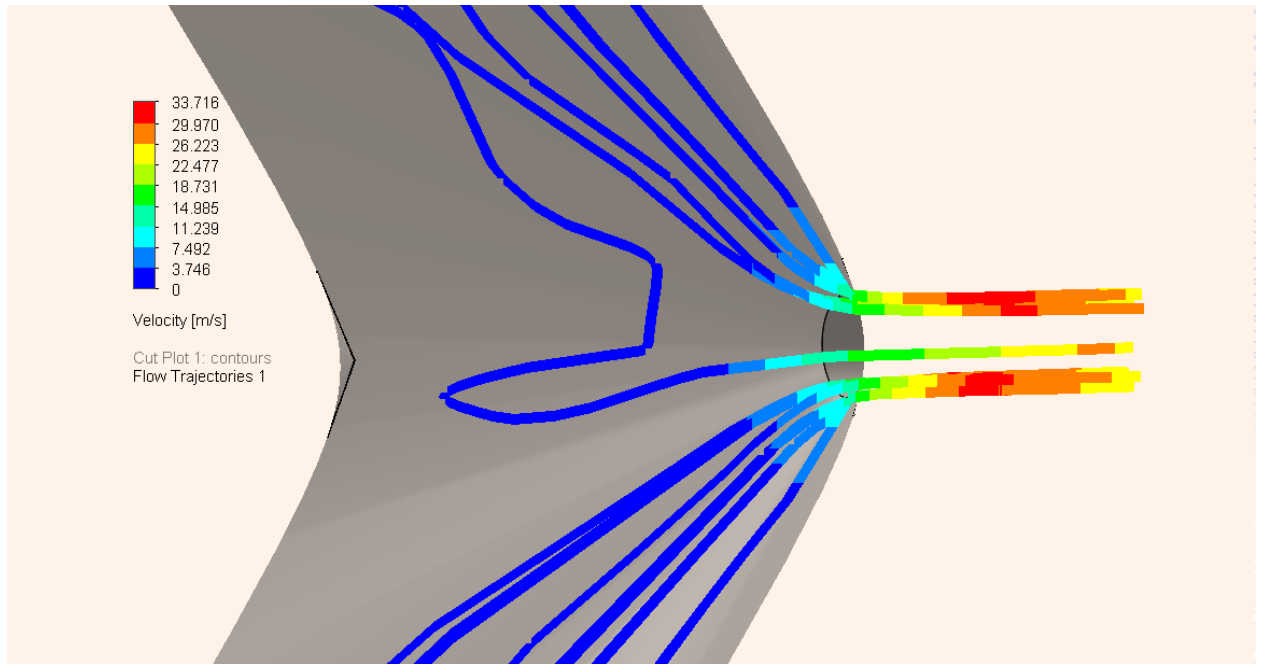


Рисунок 2.21 Збільшення швидкості в соплі

Аналіз епюр розподілу тиску демонструє тенденцію, аналогічну до результатів розподілу швидкостей (Рис 2.22). У внутрішніх каналах форсунки тиск зберігається на рівні близько 30 бар, що відповідає заданим граничним умовам моделювання та робочому режиму системи. Безпосередньо перед зоною виходу з сопла спостерігається характерне падіння тиску, зумовлене різкою зміною перерізу та переходом потоку в зону високих швидкостей. Це очікувана поведінка для форсунок подібного типу та свідчить про коректність формування розрахункової області та адекватність симуляції.

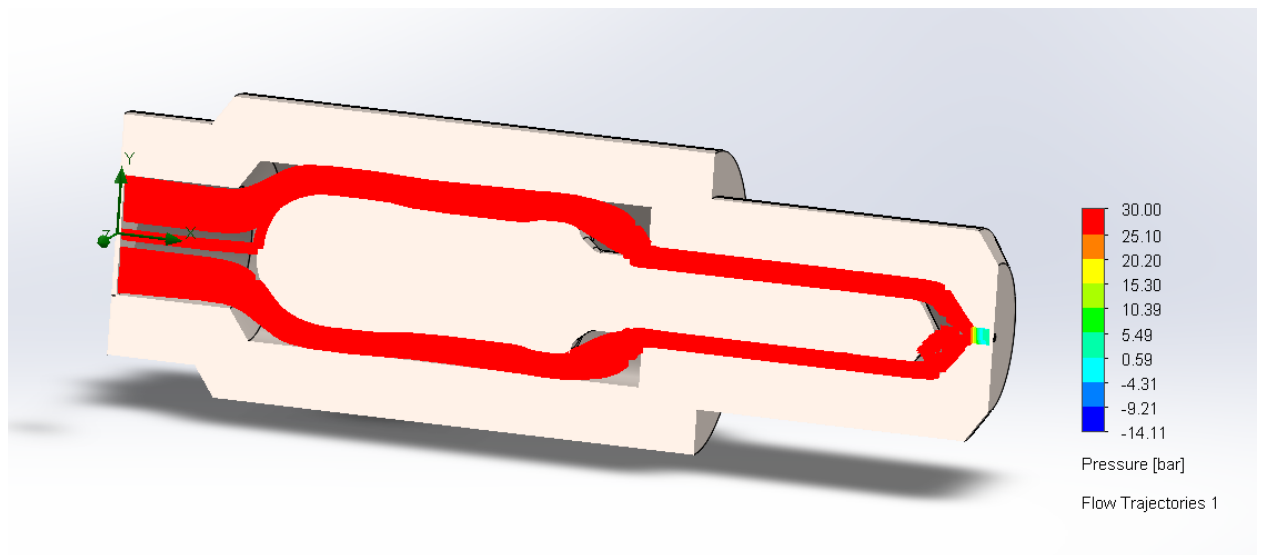


Рисунок 2.22 Епюри розподілу тиску

З огляду на результати проведеної симуляції було встановлено, що існуюча геометрія сопла створює підвищений локальний опір та сприяє виникненню завихрень у зоні різкої зміни діаметра. Такі гідродинамічні особливості можуть негативно впливати на стабільність потоку та рівномірність розпилення. Тому наступним етапом є доопрацювання конструкції деталі сопла з метою оптимізації течії рідини, а саме заокруглити різкий перехід 1 (Рис 2.23).

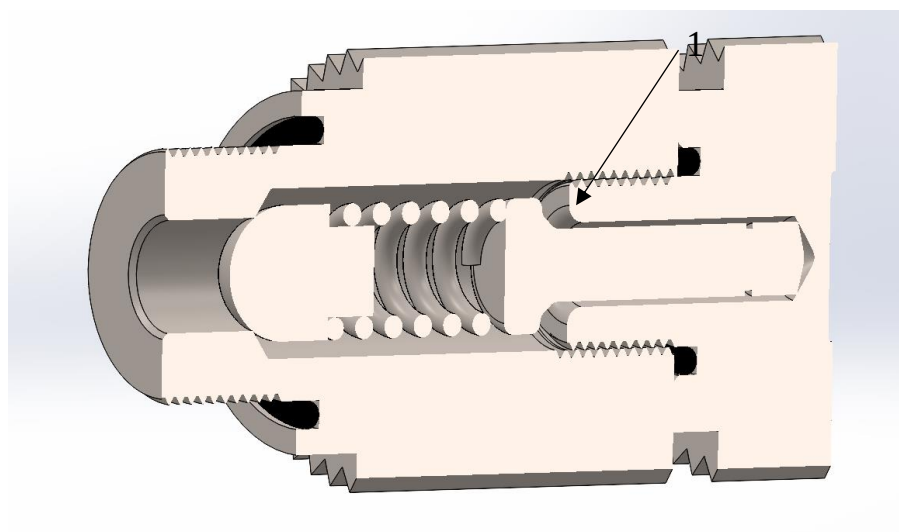


Рисунок 2.23 Змінена конструкція форсунки

Проведемо повторні дослідження, щоб побачити як зміни вплинули на роботу форсунки.

Отримані епюри розподілу швидкостей (Рис 2.24):

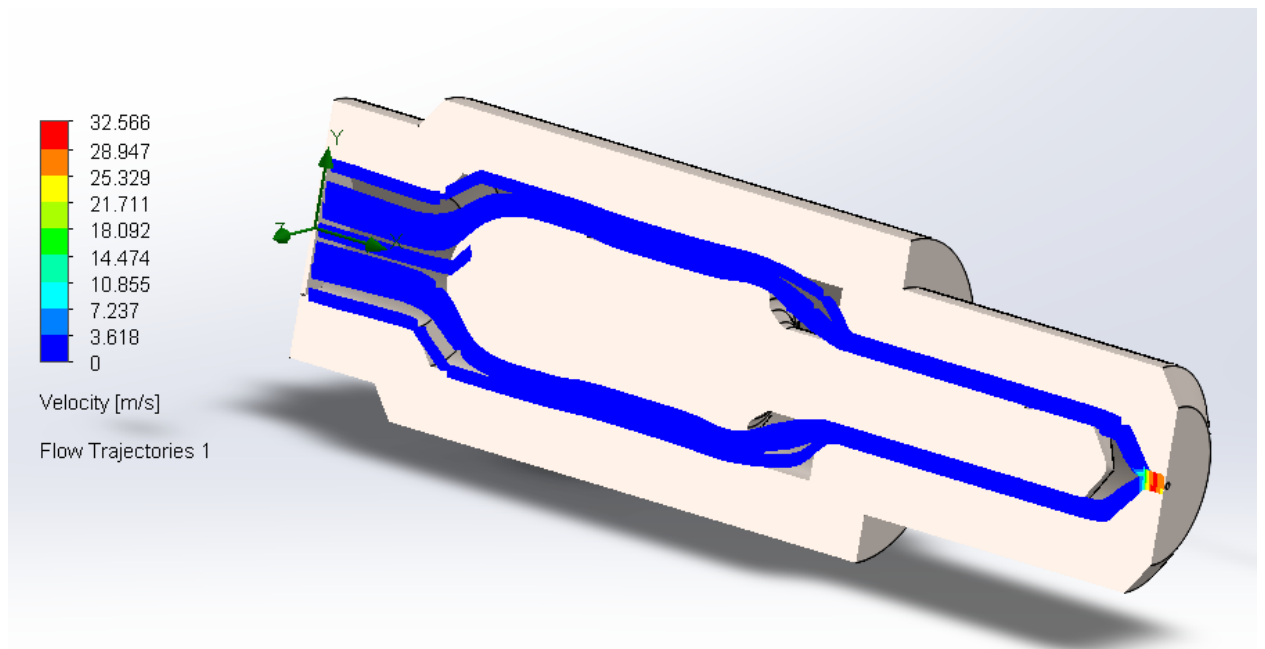


Рисунок 2.24 Епюри розподілу швидкостей

Отримані траєкторії руху рідини при більш гладкому переході (Рис 2.25):

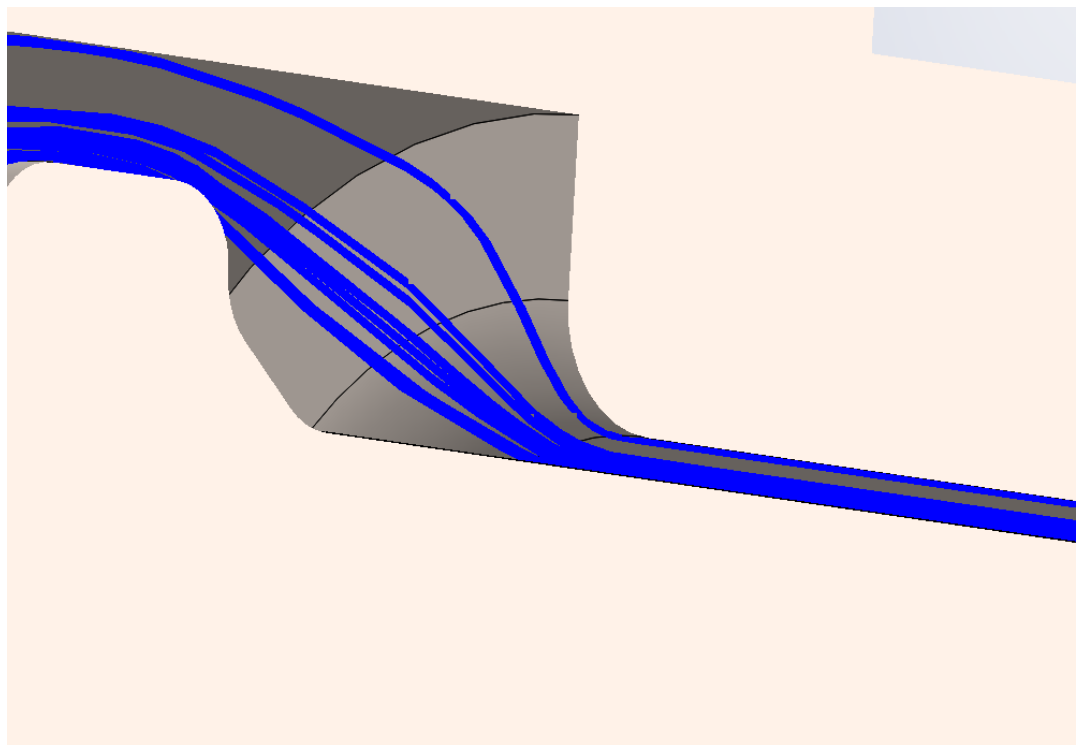


Рисунок 2.25 Траєкторії руху рідини при більш гладкому переході

2.3.2 Міцнісний аналіз конструкції форсунки за допомогою модуля SolidWorks Simulation

Для аналізу деталі сопла на міцність задамося такими параметрами. Передусім визначимо робочий тиск, який діє на внутрішні поверхні сопла, —

30 бар, що відповідає реальним умовам експлуатації форсунки у системах високотискового зволоження. Даний тиск буде прикладений як внутрішнє рівномірне навантаження на стінки каналу.

Далі задаються механічні властивості матеріалу, з якого передбачається виготовлення деталі: модуль пружності, границя текучості, границя міцності, коефіцієнт Пуассона та густина. Це дозволяє коректно змоделювати поведінку матеріалу під навантаженням.

Також визначаються граничні умови закріплення — наприклад, фіксація зовнішньої поверхні або частини корпусу, у місці де сопло взаємодіє з іншими елементами форсунки. Такий підхід забезпечує правильний розподіл реакційних сил та дозволяє отримати реалістичну картину деформацій.

Задання зазначених параметрів дасть можливість виконати повноцінний статичний аналіз напружень, оцінити запас міцності деталі та визначити, чи здатна конструкція сопла безпечно витримувати робочий тиск у 30 бар = 30 Н/мм² без деформацій або руйнування.

Створення сітки для аналізу навантаження на виході з сопла (Рис 2.26):

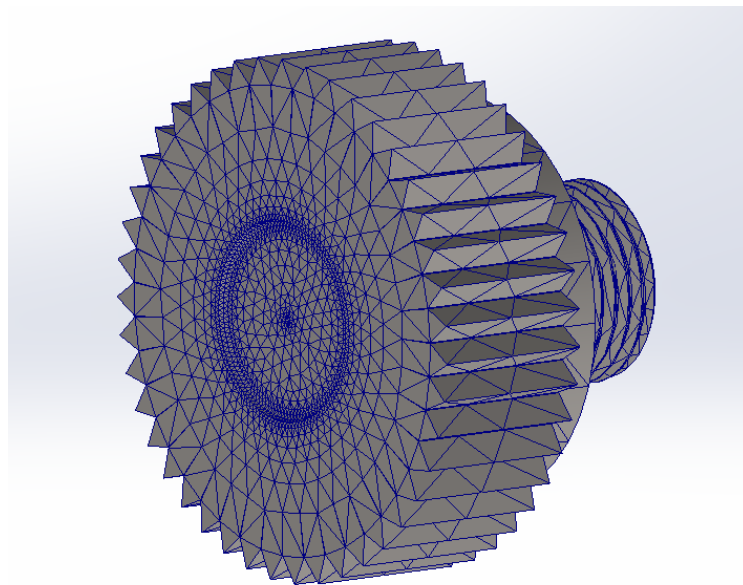


Рисунок 2.26 Сітка для аналізу навантаження на виході з сопла

Закріпимо деталь 1 та прийmemo 2 навантаження (Рис 2.27):

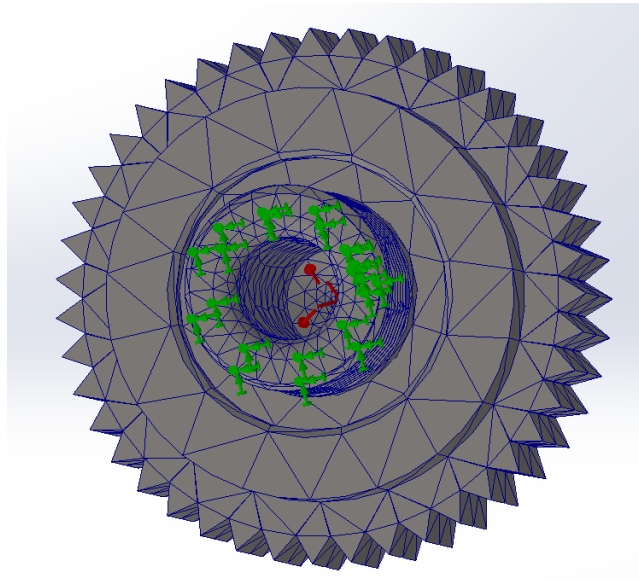


Рисунок 2.27 Налаштування навантажень

Матеріал: НЖ 14Х17Н2 ДСТУ 7350-77.

Отримані епюри переміщень (Рис. 2.28) демонструють, що максимальне значення деформації становить $4,4 \cdot 10^{-4}$ мм. Такий рівень лінійних переміщень є незначним і цілком допустимим для роботи деталі в умовах робочого тиску 30 бар. Отже, конструкція сопла успішно витримує навантаження, а отримані результати повністю задовольняють вимоги щодо запасу міцності та підтверджують надійність моделі.

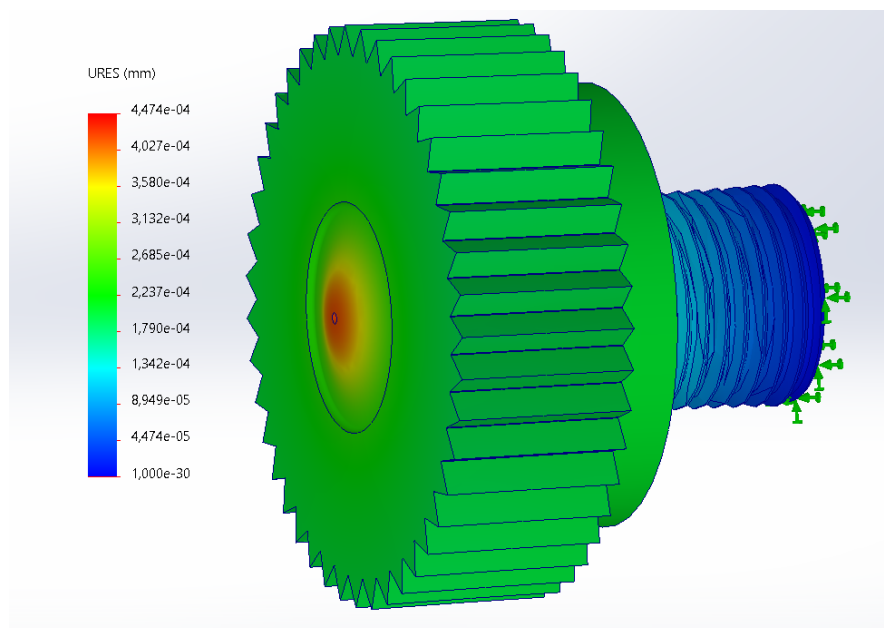


Рисунок 2.28 Епюри розподілу навантажень

2.3.3 Симуляція розпилення форсунки

У наступному етапі дослідження буде проведено моделювання процесу розпилення у програмному середовищі ANSYS Fluent із використанням методу DPM (Discrete Phase Model). Цей підхід дозволяє відслідковувати поведінку окремих частинок рідини в повітряному середовищі після виходу з сопла форсунки. На відміну від повного моделювання всієї геометрії форсунки, у даному випадку використовується спрощена схема: замість внутрішніх каналів задаються основні робочі параметри — тиск на вході 1, витрата , діаметр 2 та довжина 3 сопла, а також характеристики рідини 4, навколишнього середовища та умови розпилення (Рис 2.29).

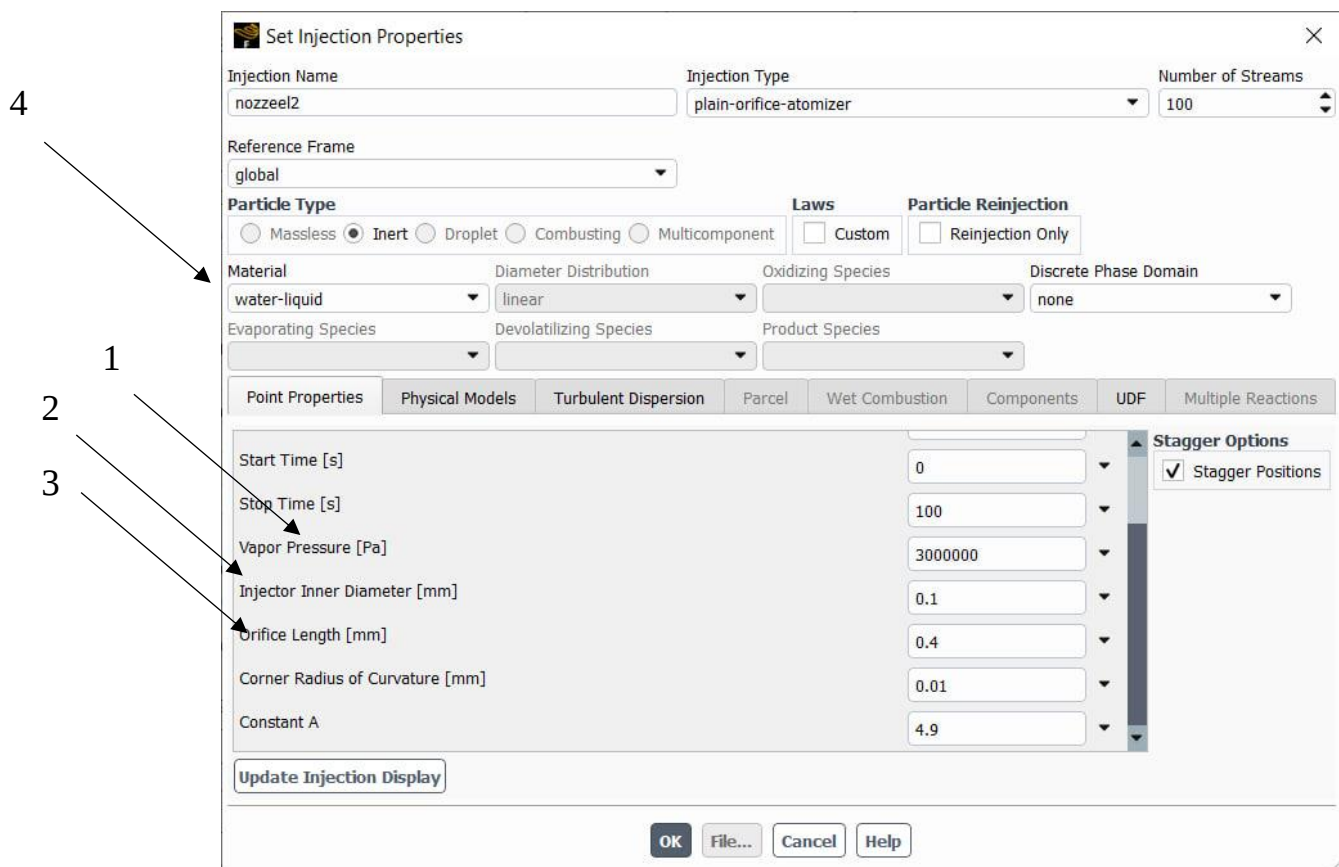


Рисунок 2.29 Налаштування DPM

Результат симуляції, а саме факел розпилу (Рис 2.30):

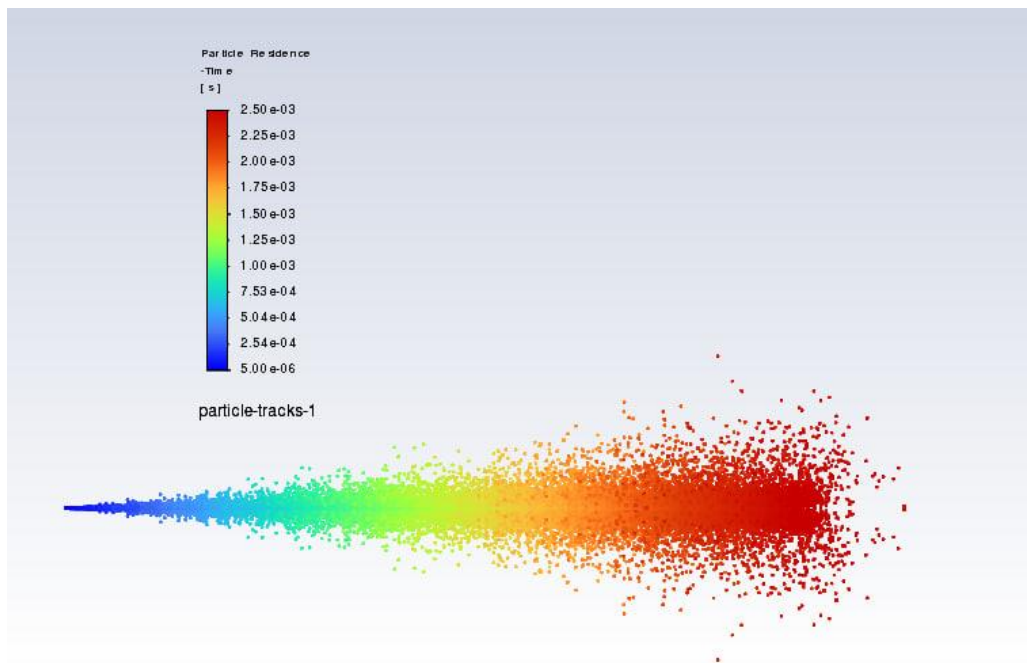


Рисунок 2.30 Факел розпилу форсунки

Довжина факелу зображена на графіку залежності довжини розпилу від часу симуляції (Рис 2.32):

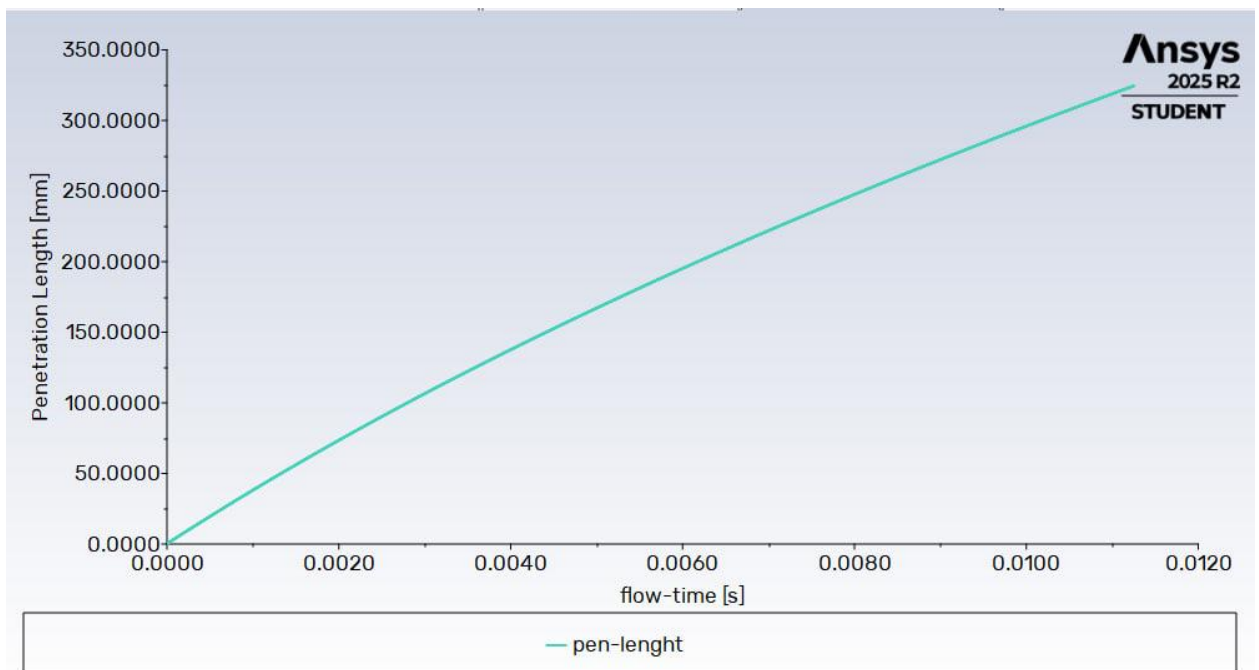


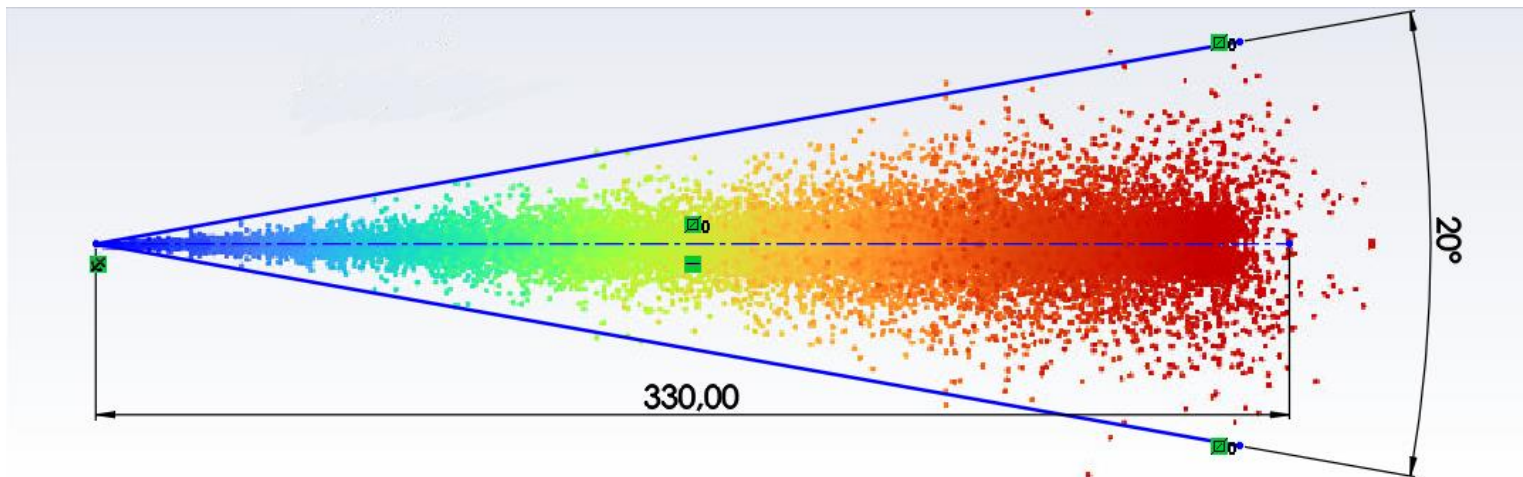
Рисунок 2.32 Графік залежності довжини розпилу від часу симуляції

З отриманих даних має, що довжина розпилу ≈ 330 мм, що є цілком реалістично для маленької форсунки з витратою 0.7 л/год та дрібним соплом.

Також були отримані дані щодо розміру краплин води, який становить приблизно $7.816649 \times 10^{-5} \text{ м} \approx 78 \text{ мкм}$. Це є хорошим показником, враховуючи можливу похибку, оскільки метод моделювання DPM не враховує низку

фізичних факторів реального процесу розпилення. Таким чином, можна вважати, що форсунка працюватиме коректно та формуватиме дрібнодисперсний туман, який не буде конденсуватись і швидко осідати на поверхнях теплиці.

Крім того, за допомогою програми SolidWorks було визначено кут розпилу (Рис 2.33), який склав приблизно 20° . Хоча такий кут є порівняно



малим, важливо враховувати особливості методу DPM: він не моделює випаровування краплин та формування зони з підвищеною вологістю біля виходу із сопла. У реальних умовах фактичний кут розпилу може збільшуватися та становити $30\text{--}40^\circ$, що є оптимальним для рівномірного розподілу туману в теплиці.

Рисунок 2.33 Кут розпилення форсунки

Таким чином, отримані дані свідчать про те, що форсунка працює стабільно, забезпечує необхідні характеристики розпилу та повністю підходить для обраної системи зволоження.

2.4 Створення електросхеми системи автоматичного зволоження повітря в теплиці та краплинного поливу

У цьому підпункті буде розроблена електрична схема керування в програмному середовищі FluidSim Hydraulics. Планується побудова об'єднаної схеми, що включатиме два основні модулі: систему капілярного поливу ґрунту та систему туманоутворення для стабілізації вологості повітря. Робота комплексу передбачає використання датчиків вологості ґрунту та

повітря, які визначатимуть моменти активації насосів та розпилювальних елементів.

Для демонстрації принципу роботи буде створена спрощена схема капілярного поливу з відображенням логіки включення насосної станції та подачі води. Аналогічно буде представлена структура системи зволоження повітря з урахуванням розташування форсунок та їх взаємодії з датчиками.

Однак у програмі FluidSim існують технічні обмеження. По-перше, відсутня можливість підключення Y-функції безпосередньо до насосної станції, через що неможливо електрично керувати насосом у стандартному вигляді. Для вирішення цього в обидві системи — як у капілярний полив, так і в систему зволоження повітря — будуть додані додаткові розподільники з електричним керуванням, розташовані на основній лінії нагнітання. Ці розподільники виконуватимуть функцію вмикання та вимикання насосної станції, замінюючи її реальний запуск у симуляції.

По-друге, у програмі неможливо використати справжні датчики вологості, оскільки вони не підтримують налаштування порогів спрацювання. У зв'язку з цим замість датчиків у схемі будуть розміщені кнопкові елементи, які виконуватимуть роль логічних тригерів. У реальній системі ці кнопки відповідатимуть фактичним сигналам з датчиків.

У системі зволоження передбачено шість форсунок, кожна з яких має окремий розподільник та керуватиметься індивідуальним датчиком вологості ДВ1-ДВ6. У програмній логіці контролера Festo (мовою STL — Statement List) буде реалізовано алгоритм, який дозволить окремо відкривати кожен форсунку залежно від локальної потреби у зволоженні повітря в конкретній зоні теплиці.

Таким чином, схема FluidSim виконує демонстраційну роль, моделюючи логічні зв'язки та порядок роботи системи, тоді як повний функціонал автоматизації, включаючи обробку сигналів датчиків і керування усіма виконавчими механізмами, буде реалізований у програмному забезпеченні контролера.

Загальний вигляд електричної схеми (Рис 2.34) :

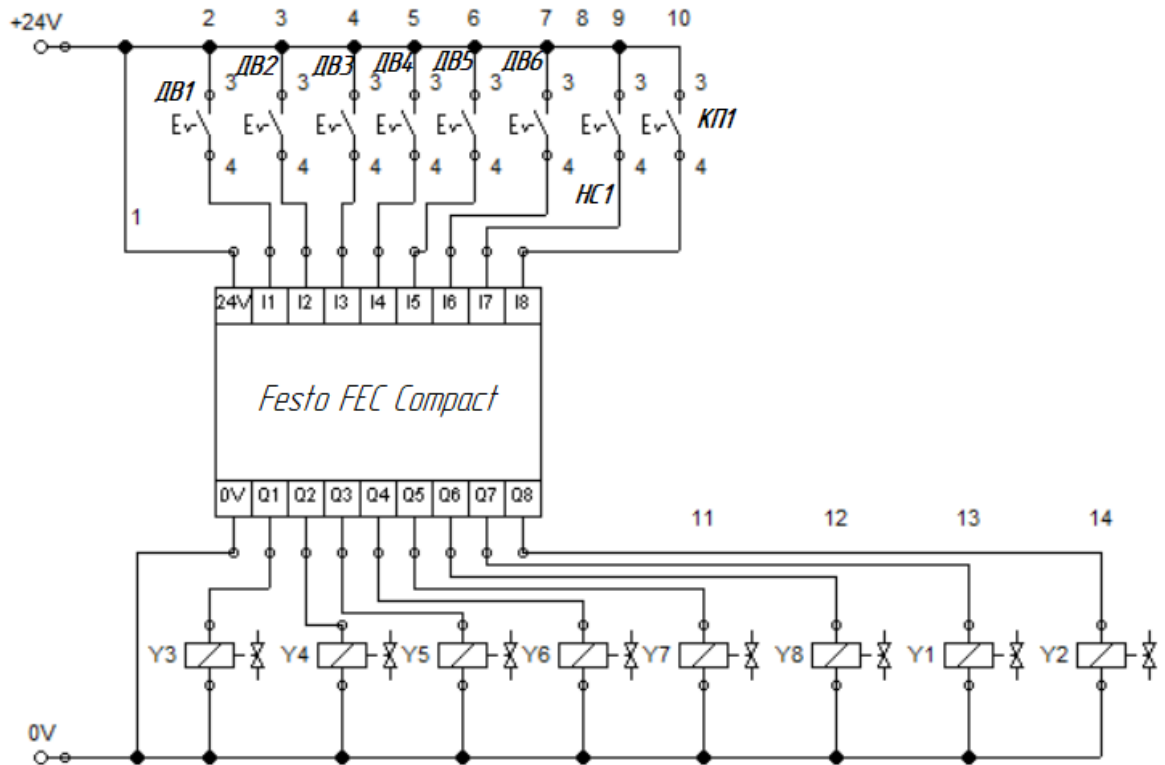


Рисунок 2.34 Загальний вигляд електричної схеми

Загальний вигляд електро-гідрав лічної схеми (Рис 2.35):

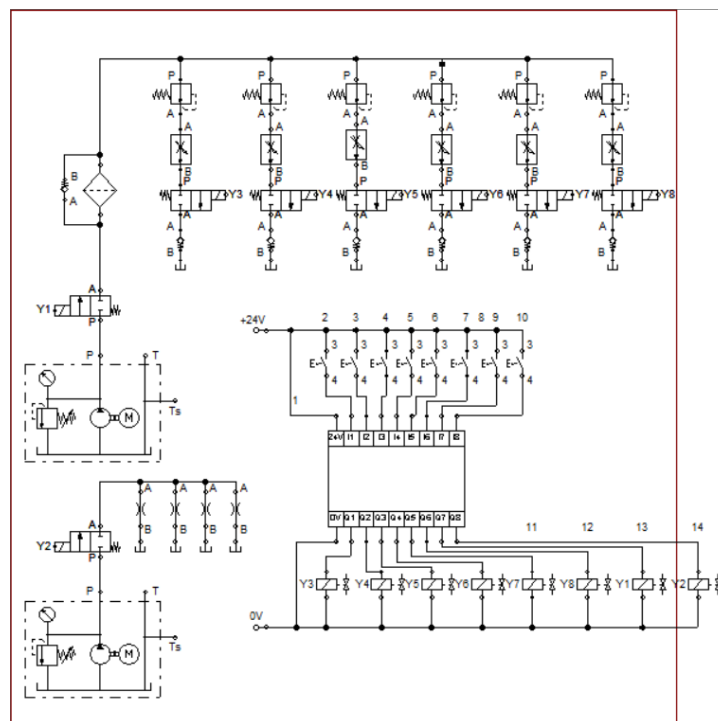


Рисунок 2.35 Загальний вигляд електро-гідравлічної схеми

Перейдемо до створення програми автоматизації, для початку був створений розподіл пам'яті (Allocation List) (Рис 2.36):

Operand	Symbol	Comment
⊗ O0.0	P_MIST	Соленоїд Насоса Туманоутворення (Y1)
⊗ O0.1	P_IRR	Соленоїд Насоса Крап. Пол. ((Y2)
⊗ O0.2	NZ1	Форсунка Зона 1 (Y3)
⊗ O0.3	NZ2	Форсунка Зона 2 (Y4)
⊗ O0.4	NZ3	Форсунка Зона 3 (Y5)
⊗ O0.5	NZ4	Форсунка Зона 4 (Y6)
⊗ O0.6	NZ5	Форсунка Зона 5 (Y7)
⊗ O0.7	NZ6	Форсунка Зона 6 (Y8)
{-} I0.0	HUM_Z1	Датчик Вологи Повітря Зона 1
{-} I0.1	HUM_Z2	Датчик Вологи Повітря Зона 2
{-} I0.2	HUM_Z3	Датчик Вологи Повітря Зона 3
{-} I0.3	HUM_Z4	Датчик Вологи Повітря Зона 4
{-} I0.4	HUM_Z5	Датчик Вологи Повітря Зона 5
{-} I0.5	HUM_Z6	Датчик Вологи Повітря Зона 6
{-} I0.6	SOIL_DRY	Датчик Вологи Ґрунту
{-} I0.7	MD_AUTO	Перемикач Авто/Ручний Режим
1010 0101 T0	T_IRR	Таймер Поливу Ґрунту
1010 0101 T1	T_MIST	Таймер Туманоутворення

Рисунок 2.36 Розподіл пам'яті (Allocation List)

Далі створення алгоритму автоматичної роботи систем зволоження повітря та краплинного поливу на мовою STL — Statement List (Рис 2.37):

IF		HUM_Z1	'Датчик Вологи Повітря Зона 1
	OR	HUM_Z2	'Датчик Вологи Повітря Зона 2
	OR	HUM_Z3	'Датчик Вологи Повітря Зона 3
	OR	HUM_Z4	'Датчик Вологи Повітря Зона 4
	OR	HUM_Z5	'Датчик Вологи Повітря Зона 5
	OR	HUM_Z6	'Датчик Вологи Повітря Зона 6
THEN	SET	P_MIST	'Соленоїд Насоса Туманоутворення (Y1)
IF	CPL	HUM_Z1	'Датчик Вологи Повітря Зона 1
	AND CPL	HUM_Z2	'Датчик Вологи Повітря Зона 2
	AND CPL	HUM_Z3	'Датчик Вологи Повітря Зона 3
	AND CPL	HUM_Z4	'Датчик Вологи Повітря Зона 4
	AND CPL	HUM_Z5	'Датчик Вологи Повітря Зона 5
	AND CPL	HUM_Z6	'Датчик Вологи Повітря Зона 6
	OR CPL	MD_AUTO	'Перемикач Авто/Ручний Режим
THEN	RESET	P_MIST	'Соленоїд Насоса Туманоутворення (Y1)
IF		HUM_Z1	'Датчик Вологи Повітря Зона 1
	AND	MD_AUTO	'Перемикач Авто/Ручний Режим
THEN	SET	NZ1	'форсунка Зона 1 (Y3)
IF	CPL	HUM_Z1	'Датчик Вологи Повітря Зона 1
	OR CPL	MD_AUTO	'Перемикач Авто/Ручний Режим
THEN	RESET	NZ1	'форсунка Зона 1 (Y3)
IF		HUM_Z2	'Датчик Вологи Повітря Зона 2
	AND	MD_AUTO	'Перемикач Авто/Ручний Режим
THEN	SET	NZ2	'форсунка Зона 2 (Y4)
IF	CPL	HUM_Z2	'Датчик Вологи Повітря Зона 2
	AND CPL	MD_AUTO	'Перемикач Авто/Ручний Режим
THEN	RESET	NZ2	'форсунка Зона 2 (Y4)
IF		HUM_Z3	'Датчик Вологи Повітря Зона 3
	AND	MD_AUTO	'Перемикач Авто/Ручний Режим
THEN	SET	NZ3	'форсунка Зона 3 (Y5)
IF	CPL	HUM_Z3	'Датчик Вологи Повітря Зона 3
	AND CPL	MD_AUTO	'Перемикач Авто/Ручний Режим
THEN	RESET	NZ3	'форсунка Зона 3 (Y5)
IF		HUM_Z4	'Датчик Вологи Повітря Зона 4
	AND	MD_AUTO	'Перемикач Авто/Ручний Режим
THEN	SET	NZ4	'форсунка Зона 4 (Y6)
IF	CPL	HUM_Z4	'Датчик Вологи Повітря Зона 4
	AND CPL	MD_AUTO	'Перемикач Авто/Ручний Режим
THEN	RESET	NZ4	'форсунка Зона 4 (Y6)
IF		HUM_Z5	'Датчик Вологи Повітря Зона 5
	AND	MD_AUTO	'Перемикач Авто/Ручний Режим
THEN	SET	NZ5	'форсунка Зона 5 (Y7)
IF	CPL	HUM_Z5	'Датчик Вологи Повітря Зона 5
	AND CPL	MD_AUTO	'Перемикач Авто/Ручний Режим
THEN	RESET	NZ5	'форсунка Зона 5 (Y7)
IF		HUM_Z6	'Датчик Вологи Повітря Зона 6
	AND	MD_AUTO	'Перемикач Авто/Ручний Режим
THEN	SET	NZ6	'форсунка Зона 6 (Y8)
IF	CPL	HUM_Z6	'Датчик Вологи Повітря Зона 6
	AND CPL	MD_AUTO	'Перемикач Авто/Ручний Режим
THEN	RESET	NZ6	'форсунка Зона 6 (Y8)
IF		SOIL_DRY	'Датчик Вологи Ґрунту
	AND	MD_AUTO	'Перемикач Авто/Ручний Режим
THEN	SET	T_IRR	'Таймер Поливу Ґрунту
	WITH	6000s	
IF		T_IRR	'Таймер Поливу Ґрунту
THEN	SET	P_IRR	'Соленоїд Насоса Крап. Пол. ((Y2)
IF	CPL	T_IRR	'Таймер Поливу Ґрунту
	OR CPL	MD_AUTO	'Перемикач Авто/Ручний Режим
THEN	RESET	P_IRR	'Соленоїд Насоса Крап. Пол. ((Y2)

Рисунок 2.37 Алгоритму автоматичної роботи систем

Створена програма забезпечує автоматичне реагування системи на зміну вологості повітря та ґрунту. Управління туманоутворенням виконується на основі сигналів шести датчиків вологості повітря, закріплених за окремими зонами теплиці. При появі сигналу про зниження вологості хоча б в одній зоні та увімкненому автоматичному режимі система подає команду SET на включення насосної станції та розподільник в зоні необхідній зоні туманоутворення. Для запобігання перезволоженню реалізовано автоматичне відключення: коли всі датчики фіксують нормальну вологість, виконується інверсія вхідних сигналів (операцією CPL, що замінює NOT) і подається команда RESET, яка вимикає подачу туману. Таким чином, туманоутворення включається за потребою і відключається автоматично після нормалізації параметрів.

Алгоритм поливу ґрунту реалізовано через запуск таймера, який моделює реальну роботу насосної станції. При надходженні сигналу "сухий ґрунт" в автоматичному режимі запускається таймер тривалістю 6000 секунд; доки таймер активний, виконується команда SET, що включає насосну станцію. Після завершення таймера або при відключенні автоматичного режиму подається команда RESET, що припиняє полив. Це дозволяє сформувати дозовану подачу води,

2.4.1 Симуляція роботи електро-гідравлічної системи

Для проведення симуляції електро-гідравлічної системи потрібно задатися граничними умовами на насосних станціях (Рис 2.38) та на гідравлічних компонентах (Рис 2.39):

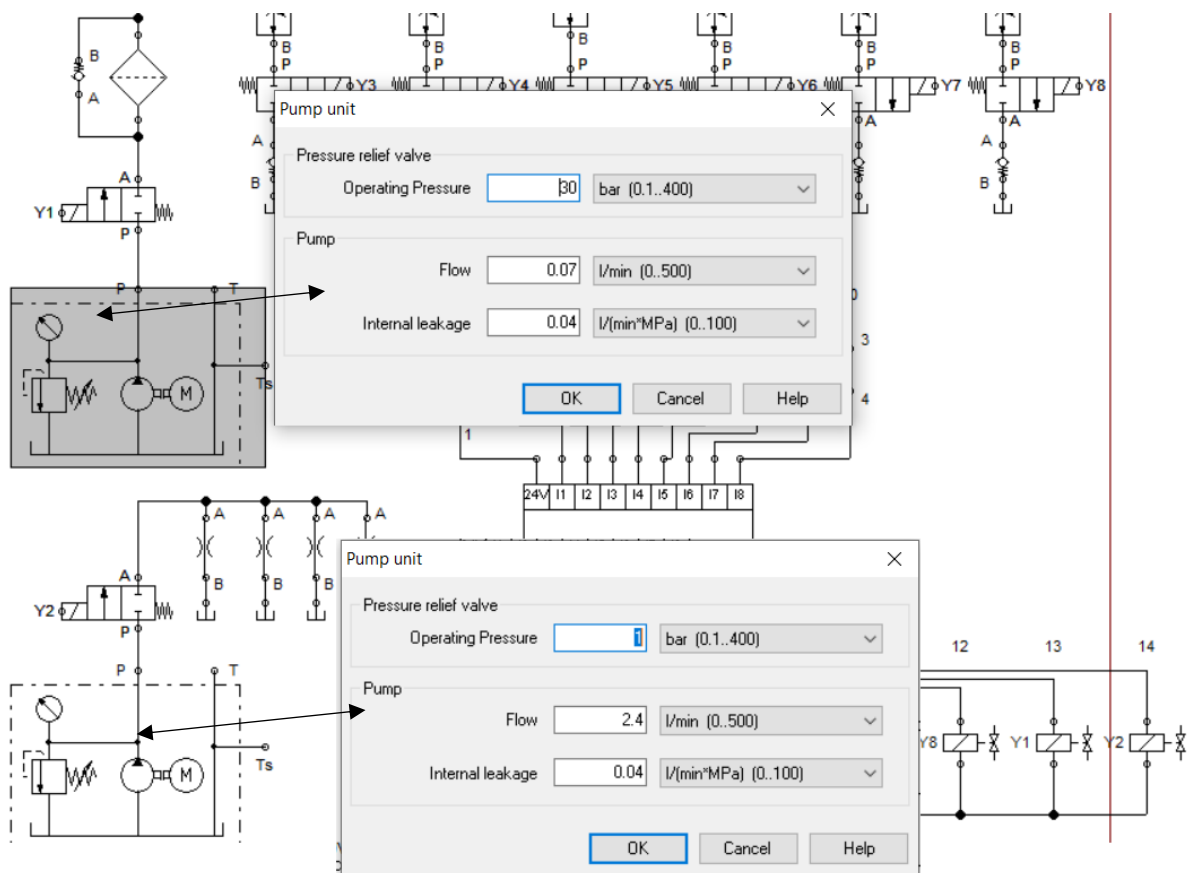


Рисунок 2.38 Граничні умови на насосних станціях

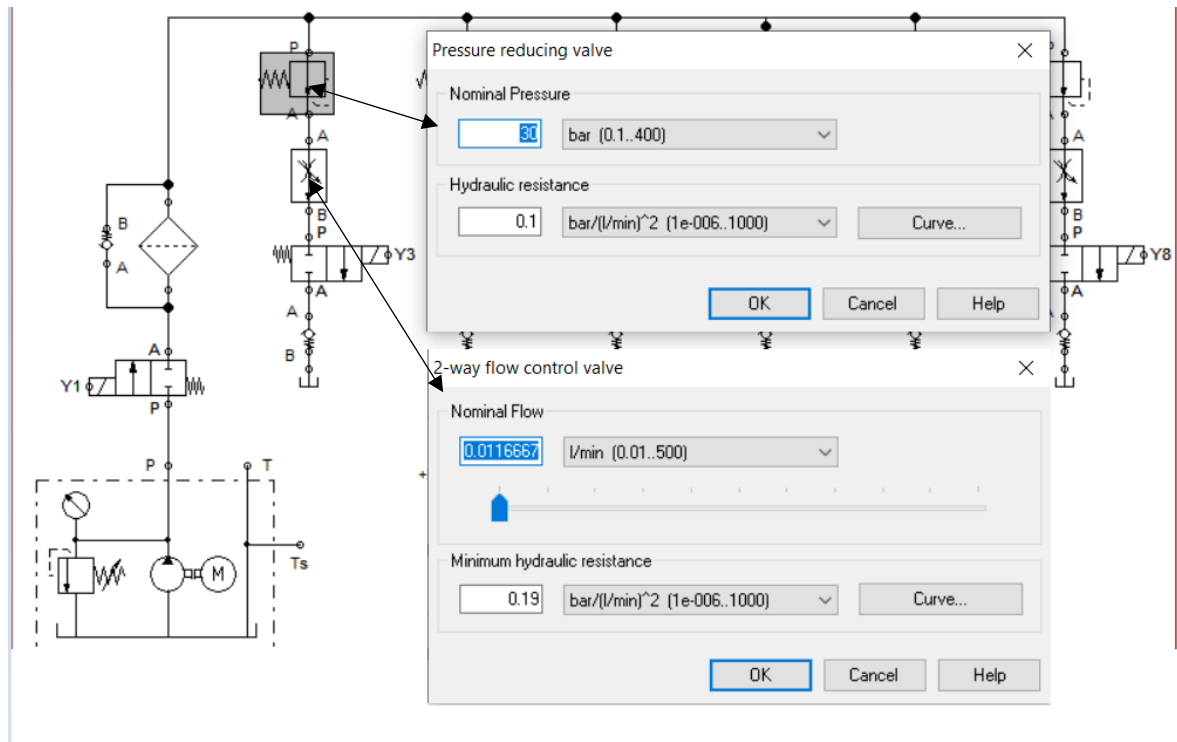


Рисунок 2.39 Граничні умови на гідравлічних компонентах

Результат роботи системи при включенні насосних станцій (Рис. 2.40):

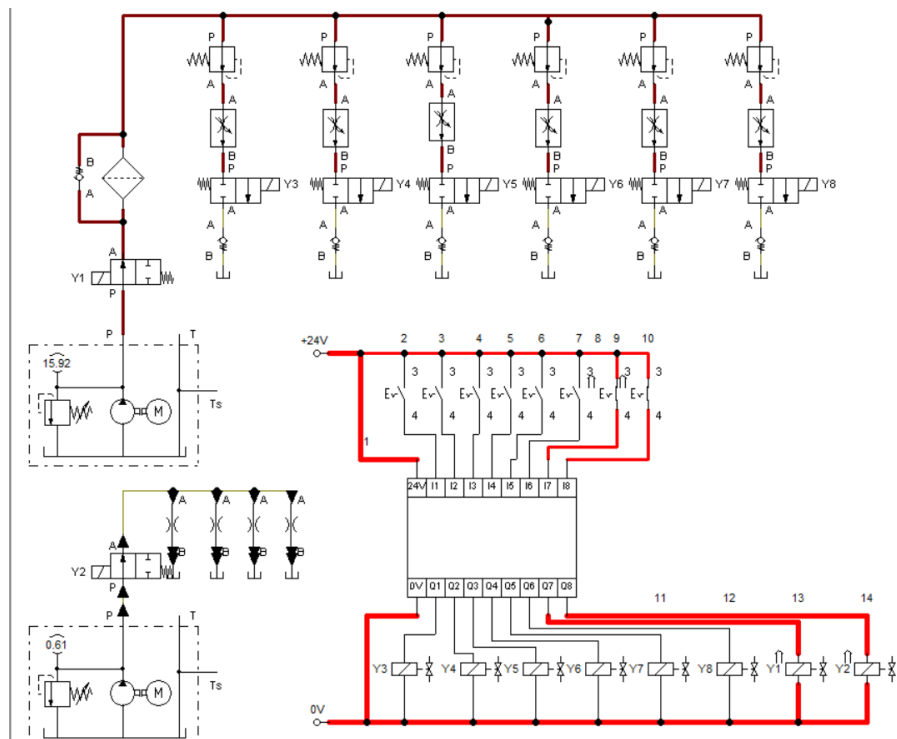


Рисунок 2.40 Результат роботи системи при включенні насосних станцій

Результат роботи системи при включенні всіх форсунок зволоження повітря (Рис 2.41):

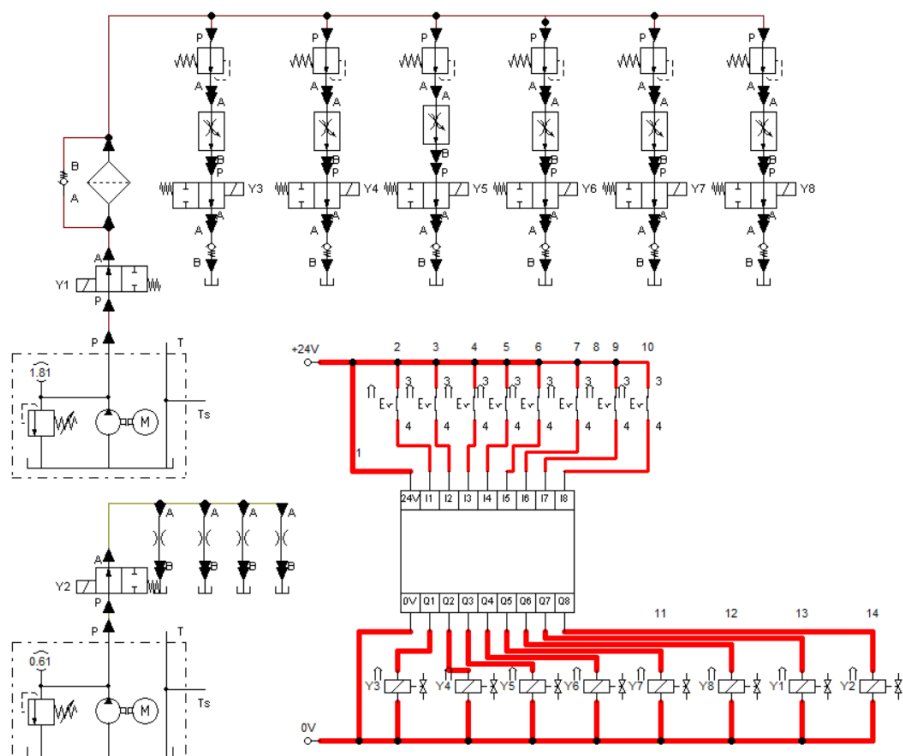


Рисунок 2.41 Робота системи при включенні всіх форсунок

Також проведемо симуляцію при включенні лише декількох форсунок (Рис 2.42):

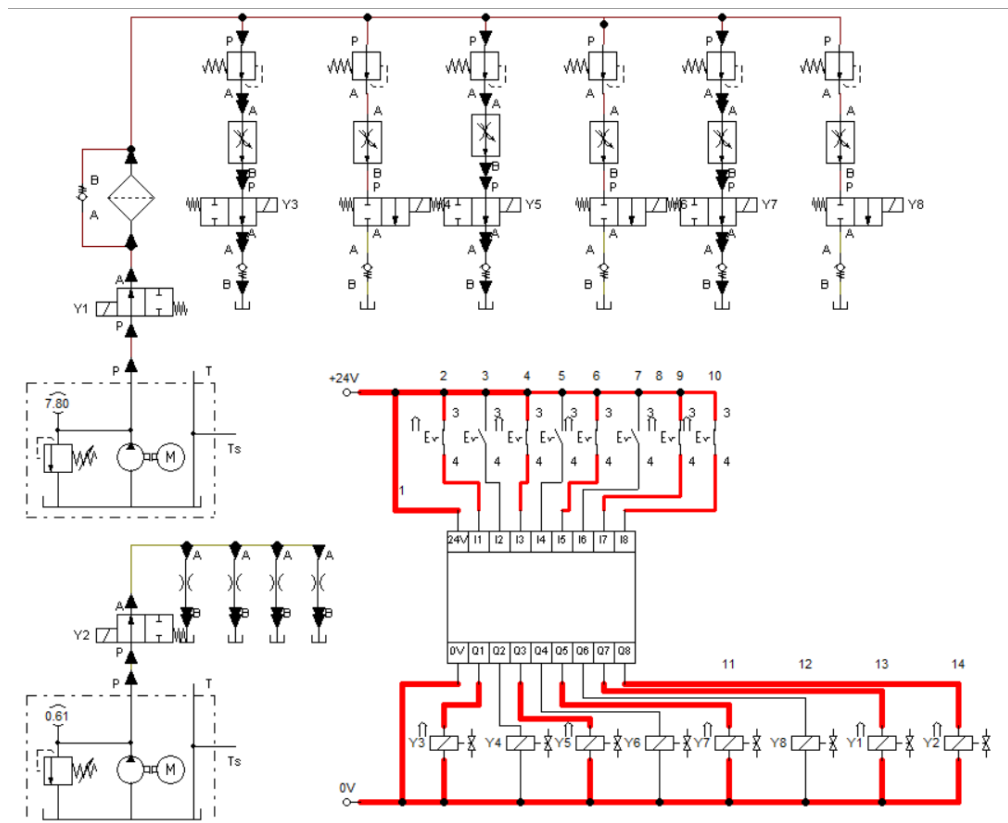


Рисунок 2.42 Симуляція при включенні лише декількох форсунок

Після проведення всіх запланованих симуляцій можна зробити висновок, що розроблена система функціонує коректно та повністю виконує поставлені перед нею завдання.

2.4.2 Підбір електричного обладнання

Для реалізації розробленої у FluidSim об'єднаної системи капілярного поливу ґрунту та туманоутворення було підібрано реальну елементну базу електричної частини, сумісну з контролером Festo FEC Compact та обраним гідрообладнанням. Як центральний пристрій управління використовується ПЛК Festo FEC Compact (Рис 2.43) з живленням 24 В DC і дискретними входами/виходами 24 В, який вже застосовувався в імітаційній моделі серед FST. Для живлення контролера, датчиків та електромагнітних клапанів передбачений блок живлення Mean Well HDR-60-24 (Рис 2.44) розрахований на промислове застосування та легко розміщений у розподільчому щиті.



Рисунок 2.43 Контролер Festo FEC Compact [29]



Рисунок 2.44 Блок живлення Mean Well HDR-60-24 [30]

Система зволоження повітря в теплиці реалізується на базі раніше обраної насосної станції aerMist 050SA та гідравлічних елементів. Для електричного керування розпилювальними форсунками використовуються шість електромагнітних клапанів HP20 з котушкою на 24 В DC, які

включаються безпосередньо від транзисторних виходів контролера Festo через захисні діоди.

Підключення датчиків вологості, які в реальній системі є аналоговими та низьковольтними, а в FluidSim були замінені на кнопкові елементи. Для контролю вологості повітря по зонах пропонується використовувати цифрові датчики температури та вологості Sensirion SHT31 (Рис 2.45) у вигляді готових модулів.



Рисунок 2.45 Датчики температури та вологості Sensirion SHT31 [31]

Кожен такий датчик живиться від 3,3-5 В і видає вимірювані значення за інтерфейсом I²C, тому його неможливо безпосередньо підключити до 24-вольтових дискретних входів FEC. Для узгодження типів сигналів та реалізації порогової логіки застосовується проміжний мікроконтролер Arduino Nano (Рис 2.46), який зчитує значення вологості з датчиків, порівнює їх із заданими порогами для кожної зони та керує релейним модулем.

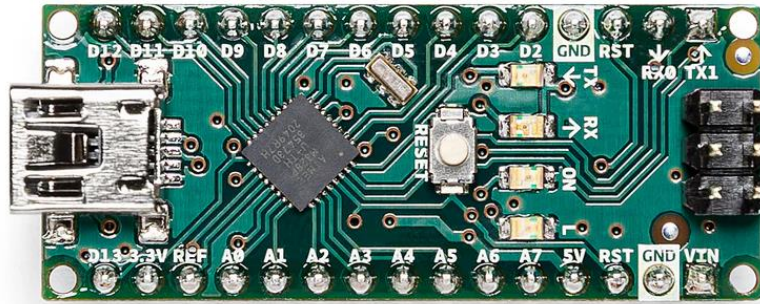


Рисунок 2.46 Arduino Nano [32]

Як комутаційний пристрій використовується стандартний 8-канальний релейний модуль для Arduino з оптронами та реле на 5 В, розрахованими на комутацію до 30 В DC/5 А або 250 В AC/10 А. Котушки реле живляться від 5 В і управляються мікроконтролером, а їх гальванічно розв'язані «сухі» контакти включаються в ланцюг 24 так, щоб при зниженні вологості в зоні нижче порога відповідний контакт замикав вхід FES на «логічну одиницю». В результаті на стороні ПЛК кожен датчик вологості представляється як звичайний дискретний вхід (HUM_Z1 ... HUM_Z6), повністю сумісний зі схемою LD-програми, розробленої FST.

Аналогічним чином організується вимірювання вологості ґрунту системи капілярного поливу. Як чутливий елемент обраний ємнісний датчик вологості ґрунту DFRobot SEN0193 (Рис 2.47), який вже розглядався в теоретичній частині роботи.

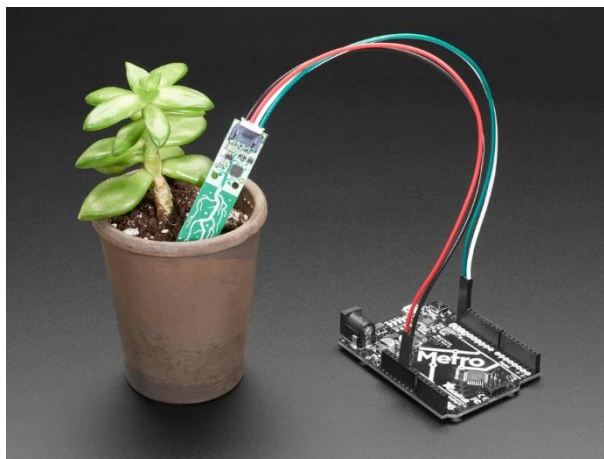


Рисунок 2.47 Датчик вологості ґрунту DFRobot SEN0193 [16]

Таким чином, всі низьковольтні датчики (вологість повітря і ґрунту) утворюють локальний модуль вимірювання на базі Arduino Nano і релейної

плати, що працює в безпечному діапазоні 5 В і перетворює аналогові вимірювання в дискретні сигнали для контролера Festo.

2.4.3 Написання коду для мікроконтролера Arduino Nano

Оскільки в електричній схемі керування передбачено використання контролера Arduino Nano, було розроблено концептуальний варіант програмного коду. Він не є остаточним чи повністю готовим до завантаження, а виступає саме як основа, на якій надалі можна будувати повноцінну програму керування системою поливу та зволоження. Такий код слугує для подальших тестувань, уточнень вже в середовищі Arduino IDE, після чого його можна буде адаптувати та завантажити в реальний контролер Arduino Nano.

Код для Arduino для системи зволоження повітря:

```
#include <DHT.h>

#define NUM_ZONES 6
#define HUM_THRESHOLD 65 // Поріг вологості повітря, %

int dhtPins[NUM_ZONES] = {2, 3, 4, 5, 6, 7}; // Піни датчиків
int relayPins[NUM_ZONES] = {8, 9, 10, 11, 12, 13}; // Піни реле

DHT dht[NUM_ZONES] = {
    DHT(2, DHT22),
    DHT(3, DHT22),
    DHT(4, DHT22),
    DHT(5, DHT22),
    DHT(6, DHT22),
    DHT(7, DHT22)
};

void setup() {
    Serial.begin(9600);

    // Ініціалізація датчиків
    for (int i = 0; i < NUM_ZONES; i++) {
        dht[i].begin();
        pinMode(relayPins[i], OUTPUT);
        digitalWrite(relayPins[i], HIGH); // HIGH = реле вимкнено (звичайний
модуль)
    }
}
```

```

void loop() {
  for (int i = 0; i < NUM_ZONES; i++) {

    float humidity = dht[i].readHumidity();

    // Перевірка помилки читання
    if (isnan(humidity)) {
      Serial.print("Ошибка чтения датчика ");
      Serial.println(i + 1);
      continue;
    }

    Serial.print("Zone ");
    Serial.print(i + 1);
    Serial.print(": Hum = ");
    Serial.println(humidity);

    // Якщо вологість НИЖЧЕ порога -> зона суха -> реле ВКЛ
    if (humidity < HUM_THRESHOLD) {
      digitalWrite(relayPins[i], LOW); // Активний LOW
    }
    else {
      digitalWrite(relayPins[i], HIGH); // Вимкнути реле
    }

    delay(500);
  }

  delay(2000);
}

```

Код для Arduino для системи краплинного поливу:

```

#define SOIL_PIN A0
#define RELAY_PIN 8

//Поріг вологості (приклад) - чим суші ґрунт, тим вище значення
#define SOIL_THRESHOLD 550

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(RELAY_PIN, OUTPUT);
  digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH); // HIGH = реле вимкнено
}

```

```

void loop() {

    int raw = analogRead(SOIL_PIN);

    Serial.print("Soil raw value: ");
    Serial.println(raw);

    // Якщо ґрунт сухий → увімкнути реле (LOW)
    if (raw > SOIL_THRESHOLD) {
        digitalWrite(RELAY_PIN, LOW); // Сигнал для Festo: 1 (сухо)
    }
    else {
        digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH); // Сигнал для Festo: 0 (волого)
    }

    delay(1000);
}

```

Висновок до розділу 2

У межах виконання другого розділу магістерської роботи було створено комплексну смарт-систему поливу та зволоження повітря для тепличного комплексу, що включає дві автономні, але взаємопов'язані підсистеми — краплинний полив та систему туманоутворення. На основі геометричних параметрів теплиці виконано розрахунок продуктивності системи та визначено оптимальні умови мікроклімату. Для підсистеми зволоження проведено аналітичний підбір конструктивних параметрів форсунки: діаметра сопла, форми каналу, робочого тиску, витрати води та типу розпилу, що забезпечує отримання дрібнодисперсного туману.

Було спроектовано гідравлічну підсистему з підбором насосної станції, фільтраційних модулів та трубопровідної арматури. Створена тривимірна модель форсунки яка пройшла повний цикл аналізів: гідродинамічну симуляцію, напружено-деформований аналіз та CFD-дослідження з використанням методу DPM в Ansys Fluent. Отримані результати підтверджують ефективність конструкції та її придатність для стабільної роботи в умовах тепличного комплексу.

У рамках автоматизації системи було розроблено електричну схему керування, яка об'єднує підсистеми поливу та зволоження, з урахуванням датчиків вологості, виконавчих елементів і логічних вузлів. Створено два програмних модулі керування: код для контролера Festo мовою STL (Statement List) та концептуальний код для Arduino Nano, який може бути використаний як основа для подальшої реалізації в Arduino IDE. Крім того, підібрано всі необхідні гідравлічні та електротехнічні компоненти, що забезпечують повну працездатність та інтегрованість системи.

Узагальнюючи, розроблена система підтвердила свою ефективність, функціональність та відповідність поставленим завданням, забезпечуючи стабільне підтримання необхідних кліматичних параметрів у теплиці та високий рівень автоматизації роботи комплексу.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЄКТУ

3.1 Опис ідеї проєкту

Об'єктом комерціалізації у межах магістерської роботи є смарт-система поливу та зрошування для теплиці з 40 денним циклом вирощування городини на базі гідравлічного обладнання та програмованого логічного контролера (ПЛК) Festo з використанням датчиків вологості повітря та ґрунту. Система призначена для енергоощадного керування подачею води в системах зрошення та зволоження повітря з можливістю дистанційного моніторингу та діагностики роботи обладнання.

Основна ідея проєкту полягає в створенні модульного рішення «під ключ», яке поєднує:

- насосну станцію та комплект гідрообладнання;
- систему вимірювання параметрів (датчики вологості, тиску, рівня, температури);
- керуючий модуль на базі ПЛК Festo з резервним вузлом на Arduino для збору та попередньої обробки сигналів від датчиків;
- алгоритми автоматичного керування та захисту обладнання;
- можливість підключення до SCADA / хмарного сервісу для візуалізації та архівування даних.

Таблиця 3.1: Згідно з аналізом, запропонована ідея є актуальною та вирішує конфлікти, що існують на ринку смарт систем зрошування та поливу: конфлікт між високим попитом на надійність та зниженням експлуатаційних витрат. Універсальність рішення дозволяє масштабувати проєкт від приватних теплиць до великих промислових об'єктів.

Таблиця 3.1 – Опис ідеї стартап проєкту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Смарт-система поливу та зрошування для теплиці з 40 денним циклом вирощування городини на базі гідравлічного обладнання та програмованого логічного контролера (ПЛК) Festo з використанням датчиків вологості повітря та ґрунту.	1. Зрошення відкритих с/г полів (крапельне, дощувальне зрошення)	Економія: Зниження витрат води до 25–40 % за рахунок поливу за фактичною потребою рослин
	2. Автоматизація поливу теплиць і тепличних комплексів	Надійність: Підвищення стабільності урожайності та якості продукції.
	3. Системи поливу газонів та зелених насаджень міст, парків, ЖК	Гнучкість: Можливість дистанційного моніторингу та оперативного реагування на аварійні ситуації

Далі визначемо сильні, слабкі та нейтральні характеристик (табл 3.2).

Таблиця 3.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик

№ п/п	Техніко- економічні характеристики ідеї	Товари/концепції конкурентів			W	N	S
		Мій проект	Конкурент 1 (виробник типових насосних станцій для зволоження та поливу)	Конкурент 2 (імпортна система поливу та зволоження)			
1	Рівень автоматизації (кількість контрольованих параметрів)	високий	низький	середній			X
2	Можливість поливу та зволоження за фактичною вологістю г	є	немає	Частково (обмежений набір датчиків)			X
3	Інтеграція з ПЛК промислового рівня	ПЛК (Festo)	немає	Плата керування		X	
4	Дистанційний моніторинг (SCADA /web- інтерфейс)	передбачено	немає	є в дорожчих моделях		X	
5	Енергоефективніс ть	Висока	Низька	Середня			X
6	Складність обслуговування	Висока	Середня	Висока		X	
7	Швидкість роботи	Висока	Середня	Висока		X	
8	Впізнаваність бренду	Низька	Висока	Висока	X		
9	Вартість	Дуже висока	Низька	Висока	X		

З цієї таблиці можна зробити висновок, що мій проєкт має значні техніко-економічні переваги перед конкурентами, оскільки пропонує унікальну функцію автономності та вищу надійність. Слабкою стороною є лише відсутність відомого бренду та більшої ціни.

3.2 Технологічний аудит ідеї проєкту

В межах даного підрозділу необхідно провести аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проєкту. Визначення технологічної здійсненності ідеї проєкту наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Технологічна здійсненність ідеї проєкту

№ з/п	Ідея проєкту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Автоматизоване керування насосною станцією поливу та зволоження	ПЛК Festo для логіки керування. Модулі введення/виведення, реле, контактори	Так	Доступні (стандартні компоненти)
2	Вимірювання вологості повітря та ґрунту	Датчики вологості на базі Arduino/інших мікроконтролерів	Так	Доступні
3	Дистанційний моніторинг та архівування даних	Інтерфейси Ethernet/Modbus, SCADA-системи, web-сервер	Так	Реалізується програмно

Проведений технологічний аудит підтверджує, що проєкт повністю технічно здійснений. Реалізація не вимагає нових наукових відкриттів, вона базується на інноваційній компіляції існуючих промислових технологій, що знижує ризики розвитку.

3.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 3.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ з/п	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од.	5–7 основних виробників/інтеграторів насосних станцій
2	Загальний обсяг продаж, грн	Сотні проєктів на рік (ринок зростаючий, точний обсяг залежить від регіону)
3	Динаміка ринку	Зростає (актуалізація проблеми економії води та енергоносіїв)
4	Наявність обмежень для входу	Потреба у сертифікації електрообладнання, досвід проєктування, репутація
5	Специфічні вимоги	Потреба у сертифікації електрообладнання, досвід проєктування, репутація
6	Середня норма рентабельності, %	Орієнтовно 30–35 %

Результати попередньої оцінки ринку роблять його привабливим для входу. Він має тенденцію до зростання, а середня прибутковість вище середньобанківських депозитних ставок: 30-35%, що виправдовує інвестиції в проєкт.

Надалі визначено потенційні групи клієнтів та їхні вимоги (табл. 4.5).

Таблиця 4.5. Характеристика потенційних клієнтів

№ з/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (сегменти)	Відмінності у поведінці різних цільових груп	Вимоги споживачів до товару
-------	--------------------------	------------------------------	--	-----------------------------

1	Стабільне зрошення с/г культур з мінімальними витратами води та енергії	Фермерські господарства. Тепличні комплекси.	Залежність від сезону, чутливість до строків окупності	Надійність, простота експлуатації, сервіс «під ключ», можливість роботи в автоматичному режимі
2	Підтримання естетичного вигляду зелених зон міст	Комунальні підприємства, ОСББ, керуючі компанії	Орієнтація на бюджетні закупівлі, формальні процедури	Відповідність стандартам, гарантія, проста інтеграція в існуючу інфраструктуру
3	Автоматизоване технічне водопостачання	Невеликі промислові підприємства	Вимоги до безперервності, інтеграції з іншими системами	Висока надійність, можливість резервування, промислові інтерфейси

Аналіз факторів загроз та можливостей наведено в табл. 3.6 та 3.7.

Таблиця 3.6. Фактори загроз

№ з/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Конкуренція	Ціновий демпінг з боку великих гравців або експансія дешевих китайських виробників, які можуть знизити ціни нижче нашої собівартості завдяки ефекту масштабу.	Уникнення прямої цінової боротьби шляхом фокусування на унікальних технічних перевагах яких немає у дешевих аналогів.
2	Макроекономічна нестабільність	Коливання курсу валют, що призводить до здорожчання	Закладання валютних ризиків у ціну,

		імпортних комплектуючих (гідравліка, контролери Festo) та підвищення собівартості продукції.	локалізація виробництва металевих частин в Україні, створення складського запасу критичних компонентів.
3	Консерватизм частини споживачів	Небажання інвестувати в автоматизацію, орієнтація на ручне керування	Пілотні проєкти, демонстраційні установки, розрахунок економії для клієнта

Таблиця 3.7. Фактори можливостей

№ з/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Енергетична криза	Підвищений попит на енергонезалежні рішення через часті відключення електропостачання в країні.	Активна реклама унікальної функції роботи від вбудованих сонячних панелей як ключової переваги перед конкурентами.
2	Зростання тарифів на воду та електроенергію	Підвищення зацікавленості в енергоощадних рішеннях	Позиціонування продукту як інструменту економії ресурсів
3	Державні та донорські програми підтримки агро	Співфінансування модернізації інфраструктури поливу та зволоження	Підготовка типових рішень для участі у програмах, партнерство з банками

Аналіз конкурентного середовища (табл. 3.8 та 3.9).

Таблиця 3.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
Тип конкуренції	Монополістична конкуренція з елементами олігополії	Необхідність чіткого позиціонування та диференціації
Національний та міжнародний рівень конкурентної боротьби	Національний, з локальними регіональними гравцями	Важливість локальних партнерств і сервісних центрів
Внутрішньогалузева конкуренція	Внутрішньогалузева конкуренція серед виробників насосних станцій та інтеграторів	Потрібні інженерні компетенції та глибоке розуміння технологій
Товарно-видова конкуренція	Товарно-родова і товарно-видова (різні типи автоматизованих систем поливу та зволоження)	Необхідність гнучкої комплектації рішень
Нецінова конкуренція	Переважає нецінова конкуренція (якість, сервіс, функціональність)	Акцент на інноваційність, сервіс, підтримку, а не лише на ціні
Марочна конкуренція	Середня, але з тенденцією до посилення	Потреба в постійних вдосконаленнях продукту та маркетингових активностях

Таблиця 3.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Перелік / фактори	3–5 українських інтеграторів насосних станцій, локальні виробники і автоматизації	Малі інжинірингові фірми, що можуть масштабуватися	Постачальники насосів, ПЛК, датчиків, частотних перетворювачів	Малі та середні фермерські господарства, теплиці, комунальні підприємства	Ручне керування, прості реле тиску, таймери
Бар'єри / сила	Інженерні компетенції, репутація	Бар'єри входу, помірні (потрібні знання та портфоліо)	Сила постачальників середня, можливі коливання цін	Клієнти мають певну силу через тендери та порівняння пропозицій	Замінники обмежують ціну, але не забезпечують потрібну функціональність

Висновки: інтенсивність конкуренції середня; можливість входу в ринок існує за рахунок нішевої спеціалізації та вищого рівня автоматизації. Щоб бути конкурентоспроможним, проєкт має забезпечувати відчутну економію ресурсів, надійність, локальний сервіс та зручність інтеграції.

Таблиця 3.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ з/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (чинники, що роблять фактор значущим)
1	Економія води та електроенергії	Клієнти відчують прямий фінансовий ефект, що скорочує строк окупності інвестицій
2	Надійність та захист обладнання	Вартість насоса значна, аварії ведуть до прямих втрат, тому функції захисту критично важливі
3	Локальний сервіс та адаптація	Імпортні рішення часто не враховують локальні умови та мають складнощі із сервісом
4	Дистанційний моніторинг та аналітика	Дозволяє оперативно реагувати на несправності, оптимізувати режими поливу
5	Інтеграція з існуючим обладнанням	Важливо для клієнтів, які вже мають насосні станції і прагнуть модернізації, а не повної заміни

За визначеними факторами конкурентоспроможності проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проєкту (табл. 3.11).

Таблиця 3.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ з/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали (1- 20) Мій проект	Рейтинг конкурентів
1	Економія води та електроенергії	18	+2
2	Надійність та захист обладнання	17	+2
3	Локальний сервіс та адаптація	15	+3
4	Масштабованість та модульність	12	+1
5	Дистанційний моніторинг та аналітика	13	+1
6	Вартість проекту	16	-1 (дещо дорожче простих рішень)

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (табл. 4.12).

Таблиця 4.12 – SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони (Strengths)
– високий рівень автоматизації та енергоефективності;
– адаптація під локальні умови та сервісна підтримка;
– модульність та масштабованість рішення;
– використання промислового ПЛК Festo;
– можливість інтеграції з існуючими насосними станціями
Слабкі сторони (Weaknesses)
– вища початкова вартість порівняно з найпростішими рішеннями;
– потреба у кваліфікованому персоналі для налаштування;
– обмежені ресурси невеликої команди на початковому етапі;
Можливості (Opportunities)
– зростання тарифів на воду та електроенергію;
– державні та донорські програми підтримки агросектору;
– цифровізація та інтерес до «розумних» ферм;
Загрози (Threats)
– демпінг із боку дешевих імпортованих систем;
– макроекономічна нестабільність, валютні ризики;
– посилення конкуренції з боку великих інтеграторів;

На основі можливої альтернативи впровадження стартап-проекту було викладено результати проведеного аналізу ринкового середовища, що подані в табл. 3.13.

Таблиця 3.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ з/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації

1	Нішева орієнтація на тепличні комплекси та фермерів з площею 50–200 га	Висока	12 місяців
2	Партнерство з виробниками насосних станцій та продаж рішень як додаткового модуля	Середня	8-12 місяців
3	Створення хмарного сервісу для моніторингу як окремого продукту	Середня	9-15 місяців

Обраною для старту є перша альтернатива, оскільки вона потребує менших початкових інвестицій, дозволяє швидше отримати перші впровадження та сформувати портфоліо реалізованих об'єктів. Надалі можливий перехід до моделі партнерства з виробниками насосних станцій.

3.4. Розроблення ринкової стратегії проєкту

Вибір цільових груп споживачів наведено в табл. 3.14.

Таблиця 3.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ з/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів в сприйнятти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Тепличні господарства площею 0,5–5 га.	Висока	Середній	Середня	Відносно проста

2	Фермери з системами крапельного зрошення 50–200 га	Середн я.	Високий	Середня– висока	Середн я
3	Комунальні підприємства	Середня	Середній	Середня	Складні

Обрані цільові групи: тепличні господарства та фермери з крапельним зрошенням, як сегменти з відчутною потребою в стабільному поливі та економії ресурсів, і відносно простою комунікацією з прийняттям рішень.

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформуванати базову стратегію розвитку (табл. 3.15).

Таблиця 3.15. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції	Базова стратегія розвитку
1	Нішева орієнтація на теплиці та фермерів	Концентрований маркетинг	Економія ресурсів, надійність, локальний сервіс	Стратегія спеціалізації з елементами

				диференціація
				її

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.16).

Таблиця 4.16. Визначення стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проєкт «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Частково (новий рівень автоматизації в ніші)	Переважно залучення нових споживачів, що раніше використовували прості системи	Не копіює, а доповнює функціональність конкурентів	Стратегія нішера / фахівця

На основі вимог споживачів та обраних стратегій розробляється стратегія позиціонування (табл. 4.17).

Таблиця 4.17. Визначення стратегії позиціонування

№ з/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні і позиції власного проєкту	Вибір асоціацій, які мають сформувати позицію проєкту (Бренд- меседж)
----------	--	---------------------------------	---	---

1	Надійність , економія ресурсів, простота сервісу	Спеціалізація + диференціація	Економія води та енергії, локальний сервіс	«Розумний полив, що економить воду та електроенергію»
2	Підтримка та навчання персоналу	Спеціалізація	Комплексне рішення «під ключ»	«Автоматизація поливу та зволоження під ключ з локальною підтримкою»
3	Сучасні рішення та цифровий контроль	Диференціація за технологічністю	Дистанційний моніторинг, аналітика	Енергоефективні с «Контроль поливу з вашого смартфона / комп'ютера»

У підсумку, позиція проєкту на ринку формулюється як: «Локальне інженерне рішення для розумного поливу з економією води та енергії, адаптоване до українських умов та доступне малим і середнім господарствам».

3.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач (табл. 3.18).

Таблиця 3.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	Зменшення витрат на воду та електроенергію	Оптимізація режимів поливу, уникнення надлишкового зрошення	Глибша інтеграція датчиків, алгоритми керування за фактичною вологістю
2	Підвищення надійності насосної станції	Захист від аварійних режимів, продовження ресурсу обладнання	Комплекс алгоритмів захисту з урахуванням гідравлічної схеми користувача
3	Зниження витрат ручної праці	Автоматичний і дистанційний режим роботи	Можливість повної автоматизації типових сценаріїв
4	Зручність моніторингу та аналізу	Візуалізація параметрів, архів, звіти	Інтеграція з SCADA / web-інтерфейсом, можливість дооснащення

Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару (табл. 3.19).

Таблиця 3.19. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Базова потреба: забезпечення стабільного, енергоефективного та безпечного поливу із мінімальною участю оператора.
II. Товар у реальному виконанні	– Властивості/характеристики: • Промисловий ПЛК Festo з програмним забезпеченням; • датчики вологості ґрунту, повітря, тиску, рівня; • шафа керування з силовою частиною (реле, контактори, захист);

	• інтерфейси зв'язку (Ethernet/Modbus); • панель оператора (HMI) або веб-інтерфейс. – Якість: відповідність нормам електробезпеки, тестування алгоритмів, випробування на полігоні. – Пакування: поставка у вигляді зібраної шафи керування та комплекту датчиків з технічною документацією. – Марка: торгова назва стартапу + назва лінійки систем (наприклад, «SmartIrrigate»).
III. Товар із підкріпленням	Товар із підкріпленням: – До продажу: консалтинг, обстеження об'єкта, підбір конфігурації. – Після продажу: монтаж і пусконаладження, навчання персоналу, гарантійне та післягарантійне обслуговування, оновлення ПЗ. – Захист від копіювання: реєстрація торговельної марки, авторські права на програмне забезпечення та унікальні алгоритми, ноу-хау щодо структури системи та типових схем.
Захист від копіювання	Унікальний програмний алгоритм керування (ноу-хау) та специфічна конфігурація гідравлічної схеми.

Визначення цінових меж встановлення ціни на товар (табл. 3.20).

Таблиця 3.20. Визначення меж встановлення ціни

№ з/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня межа встановлення ціни	Нижня межа встановлення ціни
1	Низький (просте реле тиску, таймер)	Середній / високий (імпортні системи)	Обмежені, чутливість до строку окупності	Ціна дещо вища за прості рішення	нижча за імпортні системи аналогічного класу

Остаточне значення ціни визначається під час фінансово-економічного аналізу проєкту з урахуванням собівартості та цільової рентабельності.

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту (табл. 3.21).

Таблиця 3.21. Формування системи збуту

№ з/п	Специфік а закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Пряма комунікація з фермерами та теплицями	Консалтинг, проєктування, продаж, монтаж, сервіс	Нульовий/однорівневий	Прямий збут через власних інженерів
2	Закупівлі через тендери (комунальні підприємства)	Підготовка тендерної документації, авторський нагляд	Однорівневий	Партнерство з монтажними організаціями на місцях

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій (табл. 3.22).

Таблиця 3.22. Концепція маркетингових комунікацій

№ з/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуютьс я цілові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонуванн я	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Фермери, що шукають практичні рішення	Галузеві виставки, соцмережі, рекомендаці ї	Економія ресурсів, надійність, простота	Пояснити економічний ефект та простоту впровадження	«Скільки води і грошей ви втрачаєте щосезону?»
2	Власники теплицьзнизит и операційні витрати	Прямі візити, демонстраці йні	Стабільніст ь урожаю, контроль параметрів	Показати стабільність умов виращування та окупність	«Постійний мікроклімат для вашої теплиці без зайвих зусиль»
3	Зацікавлені сть у нових технологіях: Пошук сучасних рішень для заміни застарілих	Технічні форуми, вебінари для інсталяторів , YouTube- огляди	Інноваційні сть та Гнучкість	Повідомле ння про переваги гідроаккумулят ора та адаптивного ПЛК	"Модернізу йте систему безпеки без зайвих витрат і розумна заміна старому обладнанню"

Висновки до розділу 3

У розділі проведено маркетинговий аналіз стартап-проєкту смарт-система поливу та зрошування для теплиці з 40 денним циклом вирощування

городини на базі гідравлічного обладнання та програмованого логічного контролера (ПЛК) Festo з використанням датчиків вологості повітря та ґрунту.

Показано, що:

- на цільовому ринку існує стійкий попит на енергоефективні системи поливу, обумовлений зростанням тарифів на ресурси, потребою в стабільності врожаю та модернізації інфраструктури;

- ринок характеризується середньою інтенсивністю конкуренції, а нішевий підхід та диференціація за рівнем автоматизації створюють можливість успішного входження;

- технологічна реалізація проєкту є здійсненою на основі наявних на ринку компонентів та напрацьованих рішень, а ключові сильні сторони (економія ресурсів, надійність, локальний сервіс) формують вагомі конкурентні переваги;

- проведений SWOT-аналіз підтверджує наявність суттєвих можливостей розвитку стартапу за умов активного управління ризиками, пов'язаними з макроекономічною нестабільністю та конкуренцією;

- обґрунтовано доцільність реалізації стратегії спеціалізації в сегменті тепличних господарств і фермерів з системами крапельного зрошення з перспективою розширення через партнерство з виробниками насосних станцій;

- сформовано маркетингову програму, що включає концепцію товару, підходи до ціноутворення, систему збуту та комунікацій, орієнтовану на демонстрацію економічних і технологічних переваг рішення.

Отже, результати аналізу свідчать про наявність реальних перспектив ринкової комерціалізації розробленої системи автоматизованого керування насосною станцією поливу та доцільність подальшої імплементації проєкту як стартапу.

РОЗДІЛ 4. ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ

Наступним етапом реалізації проєкту з розроблення та виготовлення вузлів системи зрошення є створення керуючої програми для технологічного процесу обробки деталей. На прикладі виготовлення деталі «Пістон» передбачається розробити повноцінну технологічну послідовність та побудувати програму керування, що забезпечить точність, стабільність і повторюваність виготовлення елемента.

Під час формування керуючої програми планується користуватися методичними рекомендаціями та стандартами, наведеними в профільній науково-технічній літературі [33–35], що дозволить забезпечити відповідність технологічних параметрів вимогам до сучасного машинобудівного виробництва. Особлива увага приділятиметься вибору режимів різання, підбору інструменту, визначенню траєкторій обробки, а також оптимізації переходів, необхідних для досягнення високої якості поверхні та точності геометричних розмірів деталі.

4.1 Завдання на розробку технологічного процесу

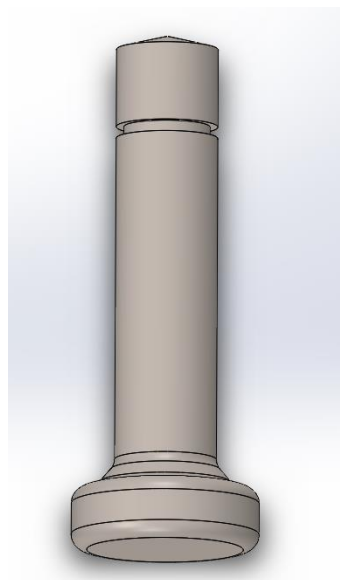


Рисунок 4.1 3д модель деталі пістон

Для розроблення технологічного процесу виготовлення було обрано деталь «Пістон» (Рис. 4.1), що є ключовим елементом зворотного клапана в конструкції форсунки. Саме ця деталь визначає коректність роботи вузла, тому її обробка потребує чітко визначеної технологічної послідовності та високої точності.

4.2 Вибір заготовки

Для виготовлення деталі «Пістон» буде використана кругла заготовка (Рис 4.2), матеріал ст. 14X17H2.

$$d = 3 \text{ мм.}$$

$$l = 10 \text{ мм.}$$

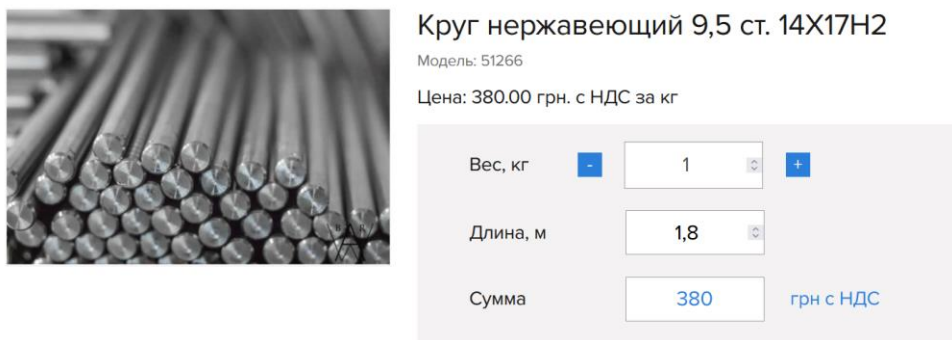


Рисунок 4.2 Кругла заготовка [36]

4.3 Розробка маршрутного технологічного процесу

Розробка маршрутного технологічного процесу (Рис. 4.3):

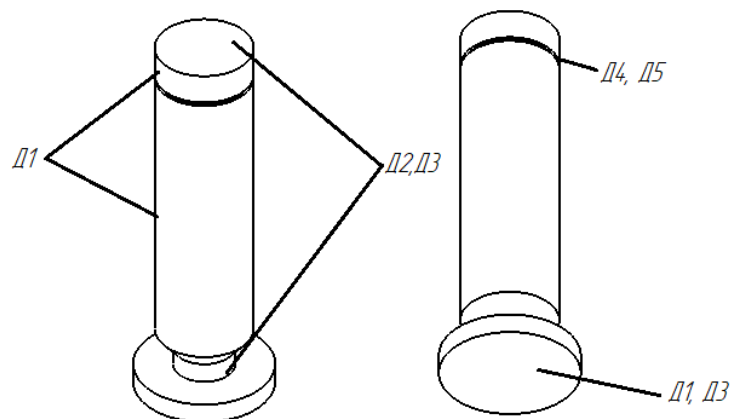


Рисунок 4.3 Розробка маршрутного технологічного процесу

Назва поверхні	Характеристики якості поверхонь за креслеником		Типова технологічна послідовність оброблення поверхні	Характеристики якості поверхонь після оброблення	
	Точність розмірів IT	Параметр шорсткості		Точність розмірів IT	Параметр шорсткості
Д1	10	Rz 80	Фрезерування чорнове	10	Rz 80
Д1 (1)	10	Rz 80	Фрезерування чистове	10	Rz 80
Д2	10	Rz 80	Фрезерування чорнове	10	Rz 80
Д3	10	Rz 80	Фрезерування чистове	10	Rz 80
Д4	10	Rz 80	Фрезерування чорнове	10	Rz 80
Д5	10	Rz 80	Фрезерування чистове	10	Rz 80

Таблиця 4.1 технологічних переходів оброблення поверхонь деталі

У наведеній таблиці представлено послідовність технологічних переходів, що виконуються під час механічної обробки поверхонь деталі. Для кожної поверхні зазначаються вихідні вимоги згідно з креслеником, параметри

точності та шорсткості, а також типові операції та переходи, серед яких чорнові, напівчистові та чистові оброблення. Такий підхід дає змогу систематизувати технологічний процес, визначити оптимальний маршрут виготовлення та забезпечити отримання необхідних якісних показників готової деталі.

4.4 Вибір різального інструменту. Розрахунок режимів різання

- Перший перехід (Д1, Д1(1)) (Рис 4.4).
- Другий перехід (Д2) (Рис 4.5).
- Третій перехід (Д3) (Рис 4.6).
- Четвертий перехід (Д4, Д5) (Рис 4.7).

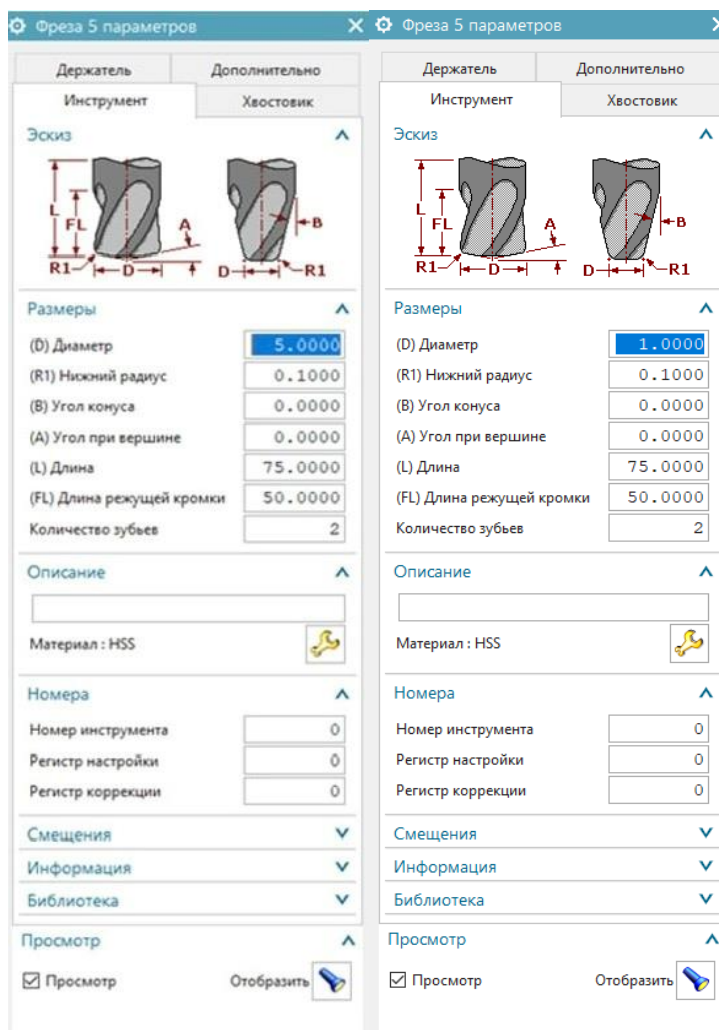


Рисунок 4.4

Рисунок 4.5

4.5 Написання управляючих програм

Технологічний процес виготовлення деталі «Пістон» було реалізовано в САМ-системі Unigraphics NX з урахуванням вимог кресленника, обраної технологічної послідовності та рекомендацій, визначених у попередніх розділах. Під час розроблення процесу було сформовано необхідні операції та переходи, підібрано режими різання та інструмент, що забезпечує отримання заданої точності та якості поверхні.

- 1 перехід, фрезерування зовнішніх поверхонь (Рис 4.9):

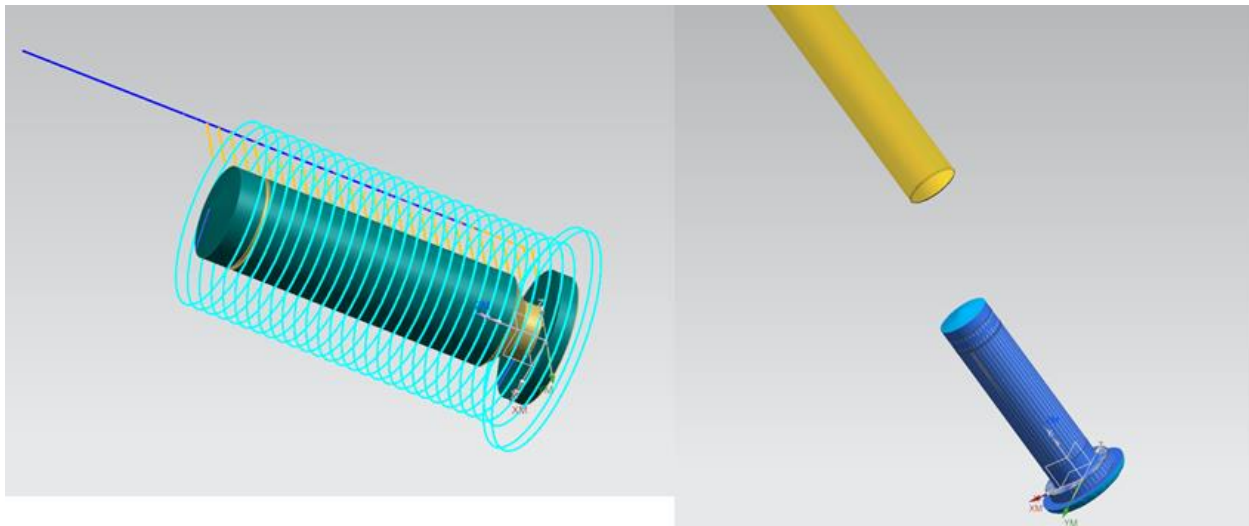


Рисунок 4.9 Фрезерування зовнішніх поверхонь

- 2 перехід, фрезерування торців (Рис 4.10):

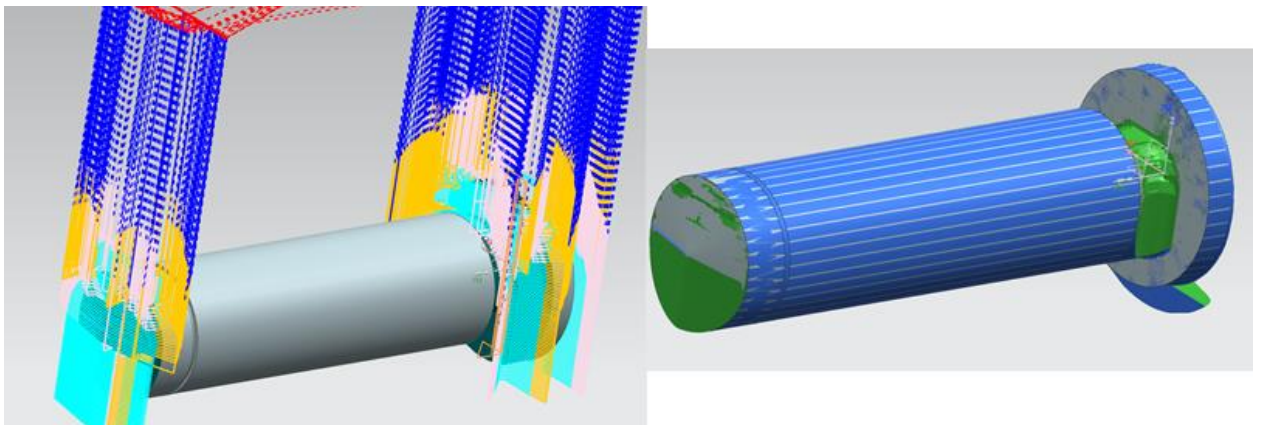


Рисунок 4.10 Фрезерування торців

- 3 перехід обробка торців (Рис 4.11):

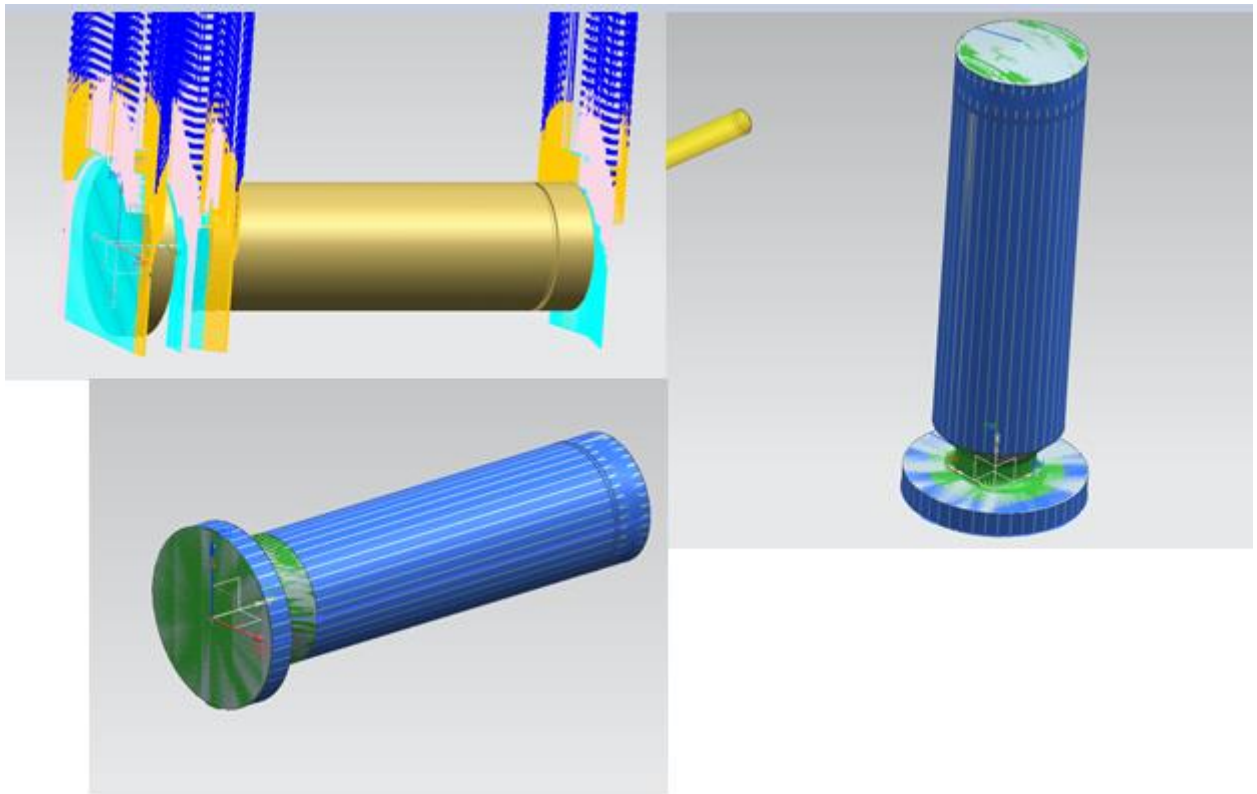


Рисунок 4.11 Обробка торців

- 4 перехід фрезерування паза (Рис 4.12):

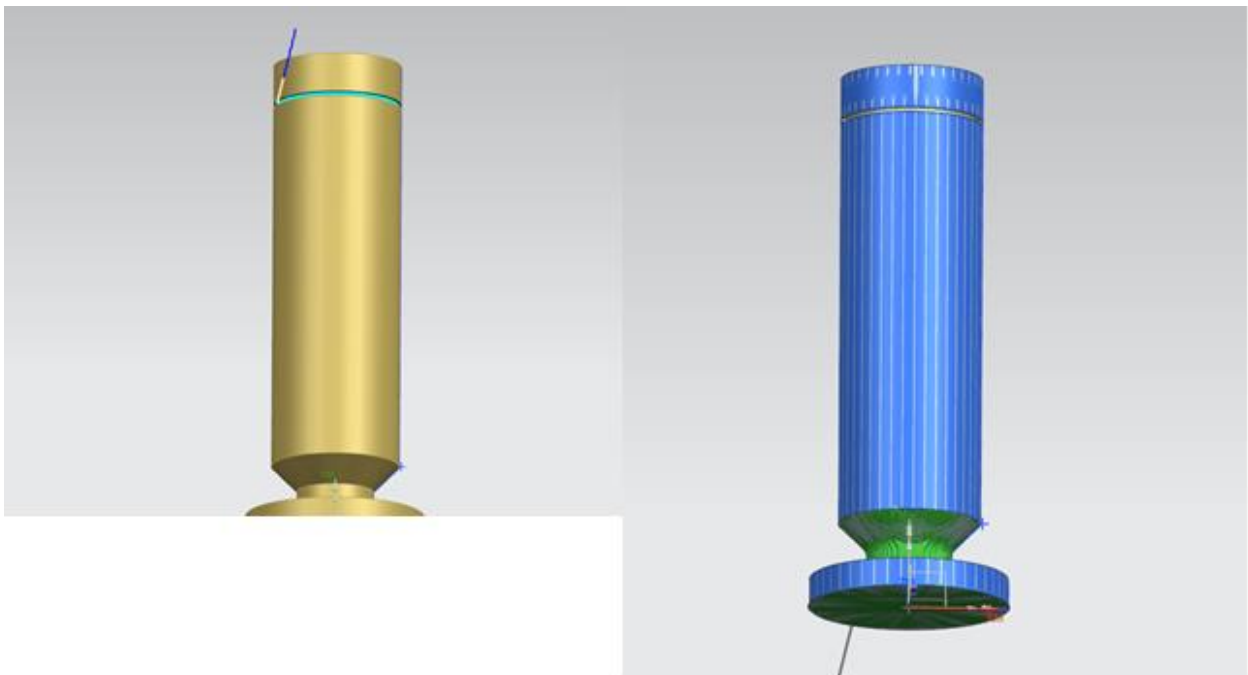


Рисунок 4.12 Фрезерування паза

Висновок до четвертого розділу:

У четвертому розділі роботи було розроблено технологію виготовлення деталі «Пістон». Використовуючи програмне забезпечення Unigraphics NX, була створена керуюча програма для верстата з числовим програмним керуванням. Після формування повного набору траєкторій обробки та технологічних параметрів передбачається завантаження отриманого коду у верстат і подальше виготовлення деталі. Після завершення обробки необхідно виконати контрольні вимірювання всіх геометричних параметрів згідно з кресленням. У разі виявлення відхилень або неточностей передбачається коригування керуючої програми з подальшим повторним виготовленням або доопрацюванням деталі.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання магістерської дисертації було розроблено комплексну гідравлічну та автоматизовану систему поливу і зволоження повітря для теплиці, яка відповідає сучасним вимогам енергоефективності, точності та надійності роботи. Проведений аналіз існуючих рішень мікроклімату дозволив визначити оптимальні підходи до проектування та сформував технічні вимоги до системи.

Створена гідравлічна схема та виконані розрахунки необхідного тиску, витрати води й характеристик насосного обладнання забезпечили можливість адаптації системи під різні режими роботи теплиці. На основі параметрів приміщення визначено раціональну кількість форсунок, а також сформовано граничні умови для подальшого моделювання, включно з тиском подачі, витратою води, діаметром сопла та кутом розпилення.

Комп'ютерні симуляції у SolidWorks Flow Simulation та ANSYS Fluent підтвердили працездатність конструкції форсунки та дозволили оптимізувати форму й робочі параметри з урахуванням динаміки потоків і характеристик дисперсного розпилення. Застосування методу DPM надало можливість оцінити рівномірність розподілу крапель та ефективність зволоження в робочій зоні теплиці.

Розроблена автоматизована система керування на основі датчиків вологості та температури забезпечує стабільний режим роботи обладнання та мінімізує вплив людського фактора. Створене програмне забезпечення для контролерів FESTO та мікроконтролерів Arduino реалізує збір даних, передачу сигналів та автоматичне керування насосом і клапанами відповідно до встановлених порогових значень.

У роботі також визначено технологічний процес деталі пістон.

Таким чином, поставлені у дисертації завдання повністю виконано. Розроблена система може бути використана для модернізації існуючих теплиць або впроваджена в нові об'єкти, забезпечуючи високий рівень автоматизації, економічність використання водних ресурсів та покращення умов вирощування рослин.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Збірник питань. Рішення для розумних теплиць: моніторинг та контроль навколишнього середовища на основі Інтернет речей (2025) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:

<https://webbylab.com/blog/smart-greenhouse-solutions-iot-based-environmental-monitoring-and-control/>

[2] Збірник питань. На шляху до автоматизованих теплиць: огляд сучасних методів та технологій моніторингу теплиць на основі Інтернет речей (2021) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169921005755>

[3] Збірник питань. На шляху до автоматизованих теплиць: огляд сучасних методів та технологій моніторингу теплиць на основі Інтернет речей (2020) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:

<https://www.ijedr.org/papers/IJEDR2004041.pdf>

[4] Збірник питань. Розумне тепличне господарство: огляд на шлях майже нульового споживання енергії (2025) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s44327-025-00096-w>

[5] Збірник питань. Економте воду за допомогою автоматизації та датчиків (2012) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:

<https://www.greenhousegrower.com/production/plant-culture/special-series/save-water-with-automation-and-sensors/>

[6] Збірник питань. Керування теплицями за допомогою SIMATIC S7-1200 (2018) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:

<https://support.industry.siemens.com/cs/document/109757060/greenhouse-control-with-simatic-s7-1200?dti=0&dl=en&lc=ru-RU>

[7] Збірник питань. Інтернет речей в автоматизації теплиць: управління кліматом за допомогою інтелектуальних датчиків (2025) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:

<https://fordewind.io/iot-in-greenhouse-automation-controlling-climate-with-smart-sensors/>

[8] Збірник питань. Система автоматичного зрошення теплиці на основі вологості (2021) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:

https://www.researchgate.net/publication/355807966_Soil_moisture_based_automatic_irrigation_control_system_for_a_greenhouse

[9] Збірник питань. Повністю автоматизовані гідропонні тепличні системи (2021) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:

<https://climatecontrol.com/fully-automated-hydroponic-greenhouse-systems/>

[10] Збірник питань. Розумне сільськогосподарське рішення для автономного керування теплицями (2021) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:

<https://arxiv.org/abs/2107.05464>

[11] Збірник питань. Що таке теплиці п'ятого покоління і чи всім вони потрібні? (2021) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:

<https://agri-gator.com.ua/2023/08/19/shcho-take-teplytsi-p-iatoho-pokolinnia-i-chy-vsim-vony-potribni-eastfruit/>

[12] Збірник питань. Навіщо потрібна теплиця: Плюси та мінуси тепличного вирощування (2023) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:

<https://novateplica.com.ua/uk/zachem-nuzhna-teplicza-plyusy-i-minusy-teplichnogo-vyrashhivaniya/>

[13] Збірник питань. Інтернет речей в автоматизації теплиць: управління кліматом за допомогою інтелектуальних датчиків (2025) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:

<https://fordewind.io/iot-in-greenhouse-automation-controlling-climate-with-smart-sensors/>

[14] Збірник питань. 8 кроків для вибору ідеальної теплиці (2025) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:

<https://growdirector.com/greenhouse-automation-reduce-labor-costs/>

[15] Збірник питань. Найкраща автоматизована гідропонна система (2025) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:

<https://getgrowee.com/automated-hydroponic-system/>

- [16] Каталог. Датчик ґрунту Adafruit STEMMA (2025) (електронна стаття).
– Режим доступу до ресурсу:
<https://www.adafruit.com/product/4026>
- [17]Каталог. Apogee Instruments SQ-520 (2025) (електронна стаття). –
Режим доступу до ресурсу:
<https://oman.whizzcart.com/product/22693257/apogee-instruments-sq-520-full-spectrum-smart-quantum-sensor-usb-with-apogee-instruments-neoprene-case/>
- [18]Каталог. Електромагнітний датчик витрати Siemens SITRANS F M MAG 5100W (2025) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:
<https://www.processinstrumentsolutions.co.uk/product/siemens-sitrans-f-m-magflo-5100-w/>
- [19] Стаття. «Модель об'єкту керування мехатронної системи мікроклімату теплиці середнього об'єму» - Mech. Adv. Technol. Vol. 7, No. 3, 2023, pp. 330–336» – Режим доступу до ресурсу:
<https://journal.mmi.kpi.ua/article/view/290773/289501>
- [20]Стаття. Формули об'ємів прямокутного паралелепіпеда і куба (2025) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:
<https://disted.edu.vn.ua/courses/learn/2339>
- [21]Каталог. Форсунка для туману високого тиску (2025) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:
https://www.lechler.com/fileadmin/media/datenblaetter/agrар/EN/lechler_agrar_datenblatt_2mn_en.pdf
- [22]Стаття. «Автоматизована гідравлічна система поливу та зрошування тепличного господарства» (2024) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:
<https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/ac80fdf0-49ac-4123-8938-0778b6b10973/content>
- [23]Каталог. ES-FLOW (2025) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:
<https://products.bronkhorst.com/media/gtxh13e4/1176-es-112c-en-datasheet.pdf>

[24]Каталог. Корпус фільтра (2025) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:

<https://fogco.com/product/10-filter-housing-w-1-ports/>

[25]Каталог. Електромагнітний клапан високого тиску HP20 (2025) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:

<https://hpcontrol.eu/elektrozawor-wysokiego-cisnienia-hp20-1-4-230v-12v-24v.html?fee=3&fep=553&utm>

[26]Каталог. Регулятор тиску TESCOМ™ серії 22-5400 (2025) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:

<https://www.controlsonthern.com/products/valves-actuators-regulators/regulators/laboratory-regulators/pressure-regulators/tescom-22-5400-series-electropolished-pressure-regulator/?utm>

[27]Каталог. aerMist 050SA (2025) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:

<https://aermist.com/products/aermist-050sa-high-pressure-misting-pump?utm>

[28]Каталог. Комплект для зрошення Esotec Solar (2025) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:

<https://www.galaxus.ch/en/s4/product/esotec-solar-irrigation-set-drip-irrigation-set-irrigation-system-8795760?supplier=406802&utm>

[29]Каталог. Компактна система керування FESTO FEC-FC34-FST (2025) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:

<https://www.ebay.co.uk/itm/405625941876>

[30]Каталог. Mean Well HDR-60-24 (2025) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:

<https://www.meanwell-web.com/en/mean-well-hdr-60-24-hdr-60-24>

[31]Каталог. Розумний гаджет Sensirion SHT31 (2025) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:

<https://www.digitec.ch/en/s1/product/sensirion-sht31-smart-gadget-sensor-electronics-modules-6840205>

[32]Каталог. Arduino Nano (2025) (електронна стаття). – Режим доступу до ресурсу:

https://store.arduino.cc/products/arduino-nano?srltid=AfmBOop_QNOBKWFaf8hXL4OYoY5q0qDImTjZuElei_PgOILi1g3l7Jv

- [33] Захаркін О.У. Технологічні основи машинобудування: навчально-методичний посібник/О.У. Захаркін.— Суми: Вид-во СумДУ, 2004. — 98 с.
- [34] Основи технології машинобудування / І. Назаренко, А.Т.Свідерський, Р.І. Рибалко, О.П.Дєдов / Навчальний посібник. Київ, КНУБА, 2010. — 165 с.
- [35] Технологія обробки на верстатах з ЧПК [Текст] : навч. посіб. для студ. машинобуд. спец. вищ. техн. навч. закл. / Гевко Б. М. [та ін.] ; Терноп. нац. техн. ун-т ім. Івана Пулюя, Каф. технології машинобуд. та автомобілів. - Т. : Крок, 2014. - 131 с. : табл., рис. - Бібліогр.: с. 126-128. - 300 прим. - ISBN 978-617-692-168-4
- [36] Каталог. Круг нержавіючий 9,5 ст. 14X17H2 (електронний ресурс) (2024) – Режим доступу до ресурсу:
<https://ambar.org.ua/krug-nerzhaviyuchyj-9-5-st-14h17n2>