

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "бакалавр"
спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри СКС

_____ А.І.Сегін
“ ____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ **НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Миронюк Сергій Ігорович
(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

Автоматизована система водопостачання фермерського господарства./
Automated farm water supply system

затверджені наказом по університету від 1 грудня 2025р. №894

2. Строк подання студентом закінченої випускної кваліфікаційної роботи 25 травня 2026р.

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

1. 1. Аналіз систем водопостачання фермерських господарств як об'єкта автоматизації.
 - 1.1. Дослідження особливостей функціонування систем водопостачання фермерських господарств.
 - 1.2. Аналіз існуючих автоматизованих систем водопостачання для фермерських господарств.
2. Дослідження компонентів автоматизованої системи водопостачання фермерського господарства.
 - 2.1. Аналіз та вибір програмованого логічного контролера для системи автоматизованого водопостачання.
 - 2.2. Дослідження компонентів системи забору, транспортування, накопичення та розподілу води фермерського господарства.

4. 4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Провести аналіз особливостей функціонування систем водопостачання фермерських господарств та визначити можливості їх автоматизації.
2. Виконати аналіз технічних компонентів системи водопостачання та обґрунтувати вибір програмованого логічного контролера.
3. Розробити алгоритм автоматизованого керування системою водопостачання фермерського господарства.
4. Дослідити вплив параметрів ПІД-регулятора на якість функціонування системи управління.

5. Реалізувати математичну та імітаційну модель автоматизованої системи водопостачання у середовищі MATLAB/Simulink та провести аналіз результатів моделювання.

5. Перелік графічного матеріалу:

1. Simulink модель автоматизованої система водопостачання фермерського господарства

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	А.М. Шевчук к.е.н., доцент, доцент кафедри СКС		
2	А.М. Шевчук к.е.н., доцент, доцент кафедри СКС		
3	А.М. Шевчук к.е.н., доцент, доцент кафедри СКС		

7. Дата видачі завдання 1 грудня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	АНАЛІЗ СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ ФЕРМЕРСЬКИХ ГОСПОДАРСТВ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ	01.12.2025-15.01.2026	виконано
2	ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПОНЕНТІВ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВОДОПОСТАЧАННЯ ФЕРМЕРСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА	16.01.2026-15.03.2026	виконано
3	РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ТА МОДЕЛЕЙ КЕРУВАННЯ СИСТЕМОЮ ВОДОПОСТАЧАННЯ ФЕРМЕРСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА	16.03.2026-30.04.2026	виконано
4.	Остаточне оформлення та подача кваліфікаційної роботи на перевірку щодо плагіату	1.05.2026-25.05.2026	виконано

Студент

Сергій МИРОНЮК

(підпис)

Керівник роботи

к.е.н., доц. Антон ШЕВЧУК

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Миронюк С.І. Автоматизована система водопостачання фермерського господарства /. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» – Західноукраїнський національний університет. Тернопіль, 2026.

У роботі розроблено автоматизовану систему водопостачання фермерського господарства. Досліджено принципи побудови автоматизованої системи водопостачання фермерського господарства. Проаналізовано сучасні підходи та компоненти для реалізації система водопостачання фермерського господарства.

ANOTATION

Myroniuk S.I. Automated Water Supply System for a Farming Enterprise – Manuscript.

Qualification thesis submitted for obtaining the Bachelor's degree in Specialty 174 “Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics”, Educational and Professional Program “Automation and Computer-Integrated Technologies” – West Ukrainian National University, Ternopil, 2026.

The thesis presents the development of an automated water supply system for a farming enterprise. The principles of design and operation of an automated water supply system for a farming enterprise were investigated. Modern approaches and components for implementing a water supply system for a farming enterprise were analyzed.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1. АНАЛІЗ СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ ФЕРМЕРСЬКИХ ГОСПОДАРСТВ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ	11
1.1 Особливості функціонування систем водопостачання фермерських господарств	11
1.2 Аналіз існуючих автоматизованих систем водопостачання для фермерського господарства	18
1.3 Постановка задачі розробки автоматизованої системи водопостачання фермерського господарства	26
2. ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПОНЕНТІВ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВОДОПОСТАЧАННЯ ФЕРМЕРСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА.....	31
2.1 Аналіз та вибір програмованого логічного контролера для системи автоматизованого водопостачання фермерського господарства	31
2.2 Дослідження компонентів системи забору, транспортування, накопичення та розподілу води фермерського господарства	37
2.3 Математичне та структурне дослідження підсистем накопичення і розподілу води фермерського господарства	47
3. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ТА МОДЕЛЕЙ КЕРУВАННЯ СИСТЕМОЮ ВОДОПОСТАЧАННЯ ФЕРМЕРСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА	62
3.1 Розробка алгоритму автоматизованого керування системою водопостачання фермерського господарства.....	62

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Миронюк С.І.			Автоматизована система водопостачання фермерського господарства		Літ.	Арк.	Акрушіє
Перевір.		Гуменний П.В..						6	
Консульт.				ЗУНУ.ФКІТ.АКІТ-42/14					
Н. Контр.		Заставний О.							
Затверд.		Сегін А.І..							

3. Дослідження впливу параметрів ПД-регулятора на якість функціонування автоматизованої системи управління забезпеченням водопостачання фермерського господарства	61
3.3 Розробка MATLAB/Simulink-моделі та моделювання роботи автоматизованої системи водопостачання	71
ВИСНОВКИ.....	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	80
ДОДАТОК А.....	83

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

АСУВ – автоматизована система управління водопостачанням
 ПЛК – програмований логічний контролер
 SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) – система диспетчерського керування та збору даних
 HMI (Human Machine Interface) – людино-машинний інтерфейс
 IoT (Internet of Things) – інтернет речей
 PLC (Programmable Logic Controller) – програмований логічний контролер
 PID (Proportional–Integral–Derivative) – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор
 ЧРП – частотний регульований привід
 ПЧ – перетворювач частоти
 RS-485 – промисловий послідовний інтерфейс передачі даних
 Modbus RTU – промисловий протокол обміну даними реального часу
 Modbus TCP – мережевий протокол передачі даних на базі TCP/IP
 MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) – протокол обміну повідомленнями для IoT-систем
 ККД – коефіцієнт корисної дії
 AI (Artificial Intelligence) – штучний інтелект
 ML (Machine Learning) – машинне навчання
 Big Data – технології обробки великих масивів даних
 ADC (Analog-to-Digital Converter) – аналого-цифровий перетворювач
 GPIO (General Purpose Input Output) – універсальні входи/виходи контролера
 RAM (Random Access Memory) – оперативна пам'ять
 ROM (Read Only Memory) – постійна пам'ять
 CPU (Central Processing Unit) – центральний процесор
 Н – напір води, м
 Q – витрата води, м³/год
 Р – потужність, Вт
 η – коефіцієнт корисної дії
 ρ – густина рідини, кг/м³
 g – прискорення вільного падіння, м/с²
 ΔР – втрати тиску, Па
 Q_{max} – максимальна витрата води
 Q_{сер} – середня витрата води
 Q_{доб} – добова витрата води
 К_{год} – коефіцієнт годинної нерівномірності
 К_{нер} – коефіцієнт нерівномірності водоспоживання
 W_{рег} – регульовальний об'єм резервуара
 W_{повн} – повний корисний об'єм резервуара
 IP (Ingress Protection) – ступінь захисту оболонки обладнання
 DCS (Distributed Control System) – розподілена система керування

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Актуальність роботи. Сучасний розвиток аграрного сектору України характеризується впровадженням інноваційних технологій, спрямованих на підвищення продуктивності сільськогосподарського виробництва, раціональне використання природних ресурсів та зниження експлуатаційних витрат. Одним із найважливіших факторів забезпечення стабільної роботи фермерських господарств є надійне та безперебійне водопостачання, від якого залежить ефективність ведення рослинництва, тваринництва та інших видів сільськогосподарської діяльності.

У сучасних умовах зростання вартості енергоресурсів, посилення вимог до ресурсозбереження та необхідності підвищення ефективності виробничих процесів особливої актуальності набуває автоматизація систем водопостачання. Використання автоматизованих систем дозволяє забезпечити оптимальний режим роботи насосного обладнання, контролювати параметри водопостачання в режимі реального часу та своєчасно реагувати на аварійні ситуації.

Традиційні системи водопостачання часто характеризуються значними втратами води та електроенергії, недостатньою точністю регулювання параметрів роботи і високою залежністю від людського фактора. Впровадження сучасних засобів автоматизації, датчиків контролю, програмованих логічних контролерів та систем диспетчеризації дає можливість підвищити надійність функціонування системи, зменшити експлуатаційні витрати та забезпечити раціональне використання водних ресурсів.

Особливого значення автоматизація водопостачання набуває для фермерських господарств, де необхідно підтримувати стабільне забезпечення водою виробничих об'єктів, систем зрошення та тваринницьких комплексів. Використання сучасних інформаційних технологій та автоматизованих засобів керування дозволяє створювати ефективні системи моніторингу й

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

управління, здатні адаптуватися до змін умов експлуатації та потреб господарства.

Мета кваліфікаційної роботи. Метою даної кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності функціонування системи водопостачання фермерського господарства шляхом розробки автоматизованої системи управління, що забезпечує надійне водопостачання, оптимізацію енергоспоживання та контроль технологічних параметрів у режимі реального часу.

Об'єкт дослідження – процеси функціонування систем водопостачання фермерських господарств.

Предмет дослідження – методи, алгоритми та технічні засоби автоматизованого управління системою водопостачання фермерського господарства.

Методи дослідження. У роботі використовуються методи системного аналізу, теорії автоматичного керування, математичного моделювання, аналізу гідравлічних процесів та сучасних інформаційних технологій. Також проведено дослідження існуючих технічних рішень і наукових підходів до автоматизації систем водопостачання.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені структурні та алгоритмічні рішення можуть бути використані під час проектування, модернізації та експлуатації систем водопостачання фермерських господарств. Запропонована система сприятиме підвищенню надійності водозабезпечення, зниженню витрат електроенергії, скороченню втрат води та покращенню ефективності управління технологічними процесами.

Апробація. Миронюк С.І. Комп'ютерно-інтегрована система керування колісним роботом/ В.О. Шигера, С.І. Миронюк, П.В. Гуменний // Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТ - 2026), Тернопіль, 2026. с.111-117.

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. АНАЛІЗ СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ ФЕРМЕРСЬКИХ ГОСПОДАРСТВ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1. Особливості функціонування систем водопостачання фермерських господарств

Забезпечення надійного та ефективного водопостачання є одним із ключових аспектів функціонування сучасного фермерського господарства. Системи водопостачання агропромислових підприємств відрізняються від комунальних за своєю структурою, режимами споживання та вимогами до якості води. Розуміння особливостей їх функціонування є необхідною умовою для проектування ефективних систем автоматичного управління.

Фермерське господарство як об'єкт водопостачання характеризується нерівномірним, сезонно залежним споживанням води. Пікові навантаження виникають у ранкові (6:00–9:00) та вечірні (16:00–19:00) години, що зумовлено технологічними процесами напування тварин, зрошення, охолодження продукції та побутовими потребами персоналу.

За джерелом водопостачання системи поділяють на: підземні (артезіанські та ґрунтові свердловини), поверхневі (ставки, річки, канали) та комбіновані. На більшості фермерських господарств України основним джерелом є підземні води, що зумовлено відносно стабільним хімічним складом та меншим ризиком мікробіологічного забруднення.

Узагальнена структурна схема системи водопостачання фермерського господарства (риунок 1.1) включає такі елементи: водозабірний вузол (свердловина або насосна станція першого підйому), водонапірний бак або резервуар-накопичувач, магістральну водопровідну мережу, розподільні вузли та споживачів різних категорій [1].

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

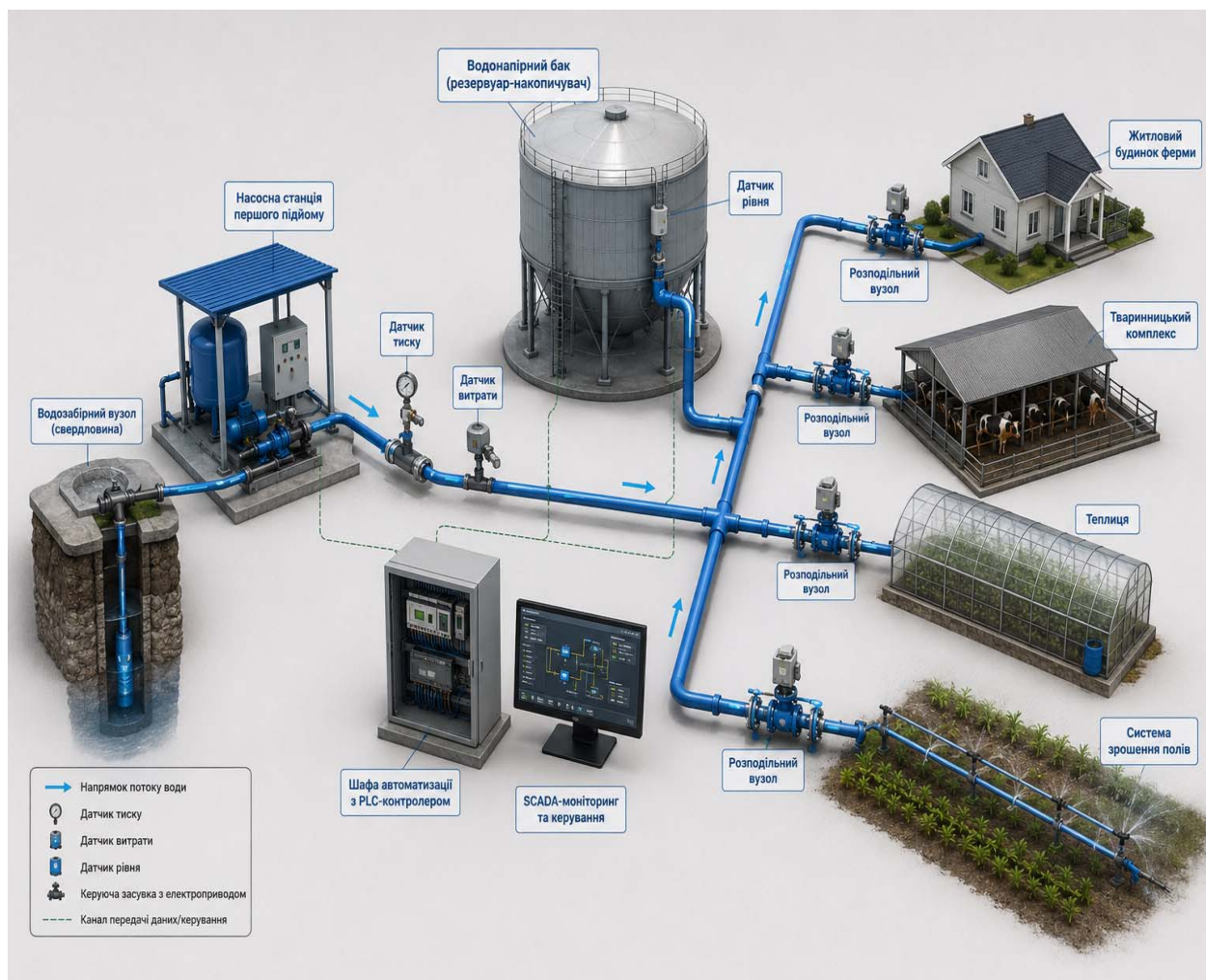


Рисунок 1.1- Структурна схема системи водопостачання фермерського господарства

Як видно з таблиці 1.1, найбільшу частку водоспоживання становить зрошення та напування великої рогатої худоби, що визначає пріоритети при розробці системи автоматичного управління.

Таблиця 1.1 – Класифікація споживачів води у фермерському господарстві

Категорія споживача	Добова норма, л/гол (м ²)	Частка від загального споживання, %	Вимоги до тиску, МПа
Велика рогата худоба	80–120	35–45	0,1–0,3
Свиновідгодівельні комплекси	25–60	20–30	0,15–0,4
Птахівництво	0,5–1,0	10–15	0,05–0,2

Зрошення (крапельне)	3–8 л/м²/добу	15–25	0,2–0,6
Побутові потреби персоналу	50–80 л/особу	5–10	0,15–0,3

Основним «розрахунковим параметром при проектуванні системи водопостачання є максимальна годинна витрата $Q_{\max}$, яка визначається за формулою нерівномірності споживання[2]:

$$Q_{\max} = K_{\text{год}} \cdot Q_{\text{сер.год}} \quad , \quad (1.1)$$

де $K_{\text{год}}$ – коефіцієнт годинної нерівномірності водоспоживання (для фермерських господарств $K_{\text{год}} = 1,8 \dots 3,5$); $Q_{\text{сер.год}}$ – середньогодинна витрата, м³/год.

Середньогодинна витрата визначається виходячи з добового водоспоживання:

$$Q_{\text{сер.год}} = Q_{\text{доб}} / T, \quad (1.2)$$

де $Q_{\text{доб}}$ – добова витрата води, м³/добу; T – тривалість водоспоживання на добу, год (як правило $T = 16 \dots 20$ год для фермерських господарств).

Добова витрата розраховується як сума витрат усіх категорій споживачів:

$$Q_{\text{доб}} = \sum (q_i \cdot n_i), \quad (1.3)$$

де q_i – питома норма водоспоживання i -го споживача (л/гол, л/м², л/особу); n_i – кількість одиниць i -го споживача.

Для забезпечення необхідного напору у всіх точках системи розрахунковий тиск на виході насосної станції P_n визначається за рівнянням Бернуллі для найбільш невідгідно розташованого споживача:

$$P_n = P_{\text{вим}} + \rho \cdot g \cdot H_{\text{геод}} + \Delta P_{\text{трубопр}}, \quad (1.4)$$

де $P_{\text{вим}}$ – мінімально необхідний тиск у точці споживання, Па; ρ – щільність води ($\rho \approx 1000$ кг/м³); g – прискорення вільного падіння ($g = 9,81$ м/с²); $H_{\text{геод}}$ – геодезична висота підйому води, м; $\Delta P_{\text{трубопр}}$ – сумарні гідравлічні втрати у трубопроводній мережі, Па.

Гідравлічні «втрати у трубопроводах розраховуються за формулою Дарсі–Вейсбаха:

$$\Delta P_{\text{трубопр}} = \lambda \cdot (L/d) \cdot (\rho \cdot v^2/2) + \Sigma \zeta \cdot (\rho \cdot v^2/2), \quad (1.5)$$

де λ – коефіцієнт гідравлічного тертя (залежить від режиму течії та шорсткості труб); L – довжина трубопроводу, м; d – внутрішній діаметр трубопроводу, м; v – середня швидкість течії, м/с; $\Sigma \zeta$ – сума коефіцієнтів місцевих опорів» [2].

Добовий графік «водоспоживання фермерського господарства має характерний двогорбий профіль, що відображає технологічні цикли виробництва. У таблиці 1.2 показано типовий годинний графік водоспоживання комбінованого фермерського господарства (тваринницька ферма + зрошуваний сад) потужністю 500 умовних голів» [3].

Таблиця 1.2 – Годинні витрати та коефіцієнти нерівномірності водоспоживання

Година доби	00–02	02–04	04–06	06–08	08–10	10–12	12–14	14–16	16–18	18–20	20–22	22–24
Q, м³/год	1,2	0,8	1,5	8,4	6,2	4,1	3,8	5,3	9,1	7,6	3,2	1,9
K _{год}	0,35	0,23	0,44	2,45	1,81	1,20	1,11	1,55	2,65	2,21	0,93	0,55

Аналіз графіка водоспоживання (таблиця 1.2) показує, що максимальний коефіцієнт нерівномірності $K_{\text{год}} = 2,65$ спостерігається у вечірній пік (16:00–18:00), що пов'язано з одночасним здійсненням вечірнього напування тварин та активної фази зрошення. Відношення максимального годинного споживання до мінімального становить:

$$K_{\text{нер}} = Q_{\text{max.год}} / Q_{\text{min.год}} = 9,1 / 0,8 = 11,4, \quad (1.6)$$

що свідчить про значну нерівномірність навантаження та обумовлює необхідність застосування регулювання подачі насосного обладнання або встановлення буферних резервуарів.

Регулювальний «об'єм резервуара-накопичувача $W_{рег}$, необхідний для вирівнювання нерівномірності водоспоживання при рівномірній роботі насосних агрегатів, визначається методом інтегрального графіка:

$$W_{рег} = (Q_{max.год} - Q_{нас}) \cdot T_{пик} \quad (1.7)$$

де $Q_{нас}$ – продуктивність насосних агрегатів при рівномірній роботі, м³/год; $T_{пик}$ – тривалість пікового навантаження, год.

Повний корисний об'єм резервуара включає регулювальний, аварійний та протипожежний запаси:

$$W_{повн} = W_{рег} + W_{авар} + W_{пожсж} \quad (1.8)$$

де $W_{авар} = 0,05 \cdot Q_{доб}$ – аварійний запас (5% від добового споживання);
 $W_{пожсж} = 10 \cdot t_{гасіння} \cdot q_{пожсж}$ – протипожежний запас (витрата на гасіння $q_{пожсж} = 5\text{--}10$ л/с протягом $t_{гасіння} = 10$ хв).

Вибір насосного обладнання здійснюється за двома основними параметрами: подачею Q_n та напором H_n . Робоча точка насоса визначається як перетин характеристики насоса $Q\text{--}H$ та характеристики системи. Характеристика системи описується рівнянням:

$$H_{сист} = H_{ст} + R \cdot Q^2, \quad (1.9)$$

де $H_{ст}$ – статичний напір, м (геодезичний підйом + тиск у споживача);
 R – гідравлічний опір системи ($R = \Delta H_{тр}/Q^2$), м/(м³/год)².

Споживана потужність насосного агрегату розраховується за формулою:

$$P_{спож} = (\rho \cdot g \cdot Q \cdot H) / (\eta_n \cdot \eta_{ел}), \quad (1.10)$$

де η_n – ККД насоса (для відцентрових насосів $\eta_n = 0,65 \dots 0,85$); $\eta_{ел}$ – ККД електродвигуна ($\eta_{ел} = 0,88 \dots 0,96$).

При використанні частотного регулювання приводу насоса продуктивність і напір змінюються відповідно до законів подібності (афінних законів):

$$Q_1/Q_2 = n_1/n_2; \quad H_1/H_2 = (n_1/n_2)^2; \quad P_1/P_2 = (n_1/n_2)^3, \quad (1.11)$$

де n_1, n_2 – частоти обертання ротора при двох режимах роботи, об/хв;
 Q_1, Q_2 та H_1, H_2 – відповідні подачі та напори; P_1, P_2 – потужності.

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Третє співвідношення свідчить про те, що зниження частоти обертання на 20% зменшує споживану потужність у 2 рази, що є головним аргументом на користь застосування частотно-регульованих приводів у системах водопостачання» [5].

Якість води для «різних категорій споживачів фермерського господарства нормується відповідними стандартами. Вода для напування тварин повинна відповідати вимогам ДСТУ 4808:2007 «Джерела централізованого питного водопостачання», а для зрошення – нормам щодо мінералізації (до 2 г/л), вмісту хлоридів (до 600 мг/л) та реакції середовища (рН = 6,5–8,5)» [6].

Ключові параметри контролю якості води у системах водопостачання фермерських господарств наведено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Параметри контролю якості води для потреб фермерського господарства

Показник	Одиниця вим.	Норма (напування худоби)	Норма (зрошення)	Метод контролю
Каламутність	мг/л	$\leq 1,5$	≤ 50	Мутномір
Твердість загальна	мг-екв/л	$\leq 7,0$	$\leq 10,0$	Титриметрія
рН	—	6,5–8,5	6,0–8,5	рН-метр
Залізо (заг.)	мг/л	$\leq 0,3$	$\leq 0,5$	Колориметрія
Нітрати (NO ₃ ⁻)	мг/л	≤ 45	≤ 80	Іонометрія
Мікробне число	КУО/мл	≤ 100	—	Посів

Аналіз функціонування систем водопостачання фермерських господарств свідчить про їх високу придатність до впровадження засобів автоматизації. Це обумовлено значною нерівномірністю водоспоживання протягом доби та сезонів, що потребує гнучкого керування продуктивністю насосного обладнання відповідно до поточних потреб споживачів. Важливим

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

завданням є також підтримання стабільного тиску у водопровідній мережі для забезпечення надійної роботи систем напування тварин, технологічного обладнання та зрошувальних установок.

Додатковим фактором, що підвищує ефективність автоматизованого керування, є можливість суттєвого зниження енергоспоживання завдяки використанню частотно-регульованих електроприводів насосів, які дозволяють адаптувати режим роботи до реального водоспоживання. Не менш важливим є безперервний контроль рівня води в накопичувальних резервуарах, що забезпечує своєчасне попередження аварійних ситуацій, пов'язаних із перепоповненням ємностей або роботою насосів без води.

Суттєве значення має і кадровий аспект, оскільки більшість малих та середніх фермерських господарств мають обмежені можливості щодо залучення кваліфікованого персоналу для постійного обслуговування систем водопостачання. За таких умов автоматизовані системи керування та захисту дозволяють підвищити надійність роботи обладнання, зменшити вплив людського фактора та забезпечити стабільне функціонування системи з мінімальною участю оператора.

Математичну «модель системи водопостачання як об'єкта управління можна описати системою диференціальних рівнянь. Для резервуара рівень $H(t)$ визначається рівнянням балансу витрат:

$$A \cdot dH/dt = Q_{\text{нас}}(t) - Q_{\text{спож}}(t), \quad (1.12)$$

де A – площа перерізу резервуара, м^2 ; $Q_{\text{нас}}(t)$ – миттєва подача насосного агрегату, $\text{м}^3/\text{год}$; $Q_{\text{спож}}(t)$ – миттєве споживання, $\text{м}^3/\text{год}$.

У разі застосування частотно-регульованого привода насоса передавальна функція підсистеми «перетворювач частоти – насос» апроксимується аперіодичною ланкою першого порядку:

$$W_{\text{нас}}(s) = K_{\text{нас}} / (T_{\text{нас}} \cdot s + 1), \quad (1.13)$$

де $K_{\text{нас}}$ – статичний коефіцієнт передачі ($\text{м}^3/\text{год}$)/(Гц); $T_{\text{нас}}$ – стала часу насосного агрегату ($T_{\text{нас}} = 1 \dots 5 \text{ с}$); s – оператор Лапласа.

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Транспортне запізнення τ в системі, зумовлене інерційністю трубопроводу, для мереж довжиною до 500 м та швидкістю поширення хвилі тиску близько 1200 м/с є незначним ($\tau < 0,5$ с) і при розробці системи управління може не враховуватись» [6].

Проведений аналіз особливостей функціонування систем водопостачання фермерських господарств дозволяє зробити такі висновки:

1. Системи водопостачання аграрних підприємств характеризуються значною нерівномірністю споживання ($K_{\text{нер}} = 5 \dots 12$) з вираженими добовими та сезонними максимумами, що вимагає застосування адаптивних алгоритмів управління.

2. Основним завданням системи автоматичного управління є підтримання стабільного тиску у водопровідній мережі та оптимальне регулювання рівня у водонапірному резервуарі при мінімальному енергоспоживанні.

3. Математична модель системи включає аперіодичну ланку насосного агрегату ($T_{\text{нас}} = 1 \dots 5$ с) та інтегруючу ланку резервуара, що визначає структуру регулятора - доцільним є застосування ПІ-регулятора з адаптацією коефіцієнтів залежно від рівня навантаження.

4. Впровадження частотно-регульованого привода насоса дозволить зменшити витрати електроенергії на 30–50%, що є вагомим економічним обґрунтуванням автоматизації систем водопостачання фермерських господарств.

1.2 Аналіз існуючих автоматизованих систем водопостачання для фермерського господарства

Забезпечення ефективного водопостачання є одним із ключових завдань сучасного фермерського господарства. Нераціональне використання водних ресурсів призводить до суттєвих економічних втрат та негативного впливу на навколишнє середовище. За даними Продовольчої та

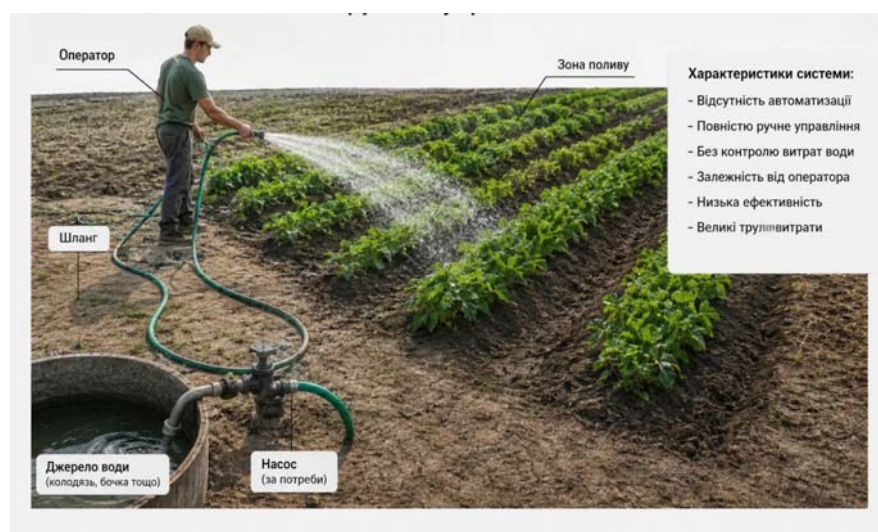
					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

сільськогосподарської організації ООН (FAO), у сільськогосподарському секторі використовується близько 70% усіх прісноводних ресурсів планети, при цьому ефективність їх використання залишається на рівні 40–60% [5].

Автоматизовані системи водопостачання у фермерських господарствах пройшли значний шлях розвитку — від простих механічних таймерів до складних інтелектуальних платформ на базі штучного інтелекту та інтернету речей (IoT). Для комплексного розуміння сучасного стану галузі необхідно здійснити аналіз існуючих систем, дослідити їх переваги та недоліки, а також визначити роль сучасних технологічних засобів у їх удосконаленні.

Системи водопостачання, що застосовуються у фермерських господарствах, можна класифікувати за рівнем автоматизації та застосовуваними технологіями. Виділяють чотири основні категорії, кожна з яких характеризується певним рівнем технологічної зрілості та функціональних можливостей.

Найпростіші системи, що базуються на безпосередній участі оператора у процесі поливу (рисунк 1.2). Характеризуються відсутністю автоматизації, повністю ручним управлінням усіма процесами та значною залежністю від людського фактору. Незважаючи на простоту та низьку початкову вартість, такі системи є найменш ефективними з точки зору раціонального використання водних ресурсів та трудовитрат.



Риунок 1.2- Ручна система поливу фермерського господарства

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Системи, у яких частина процесів механізована за допомогою насосного обладнання та розподільних мереж (рисунок 1.3), проте управління здійснюється переважно вручну або за простими механічними таймерами. Забезпечують певне зниження фізичного навантаження на персонал, але не вирішують проблеми оптимізації водоспоживання.

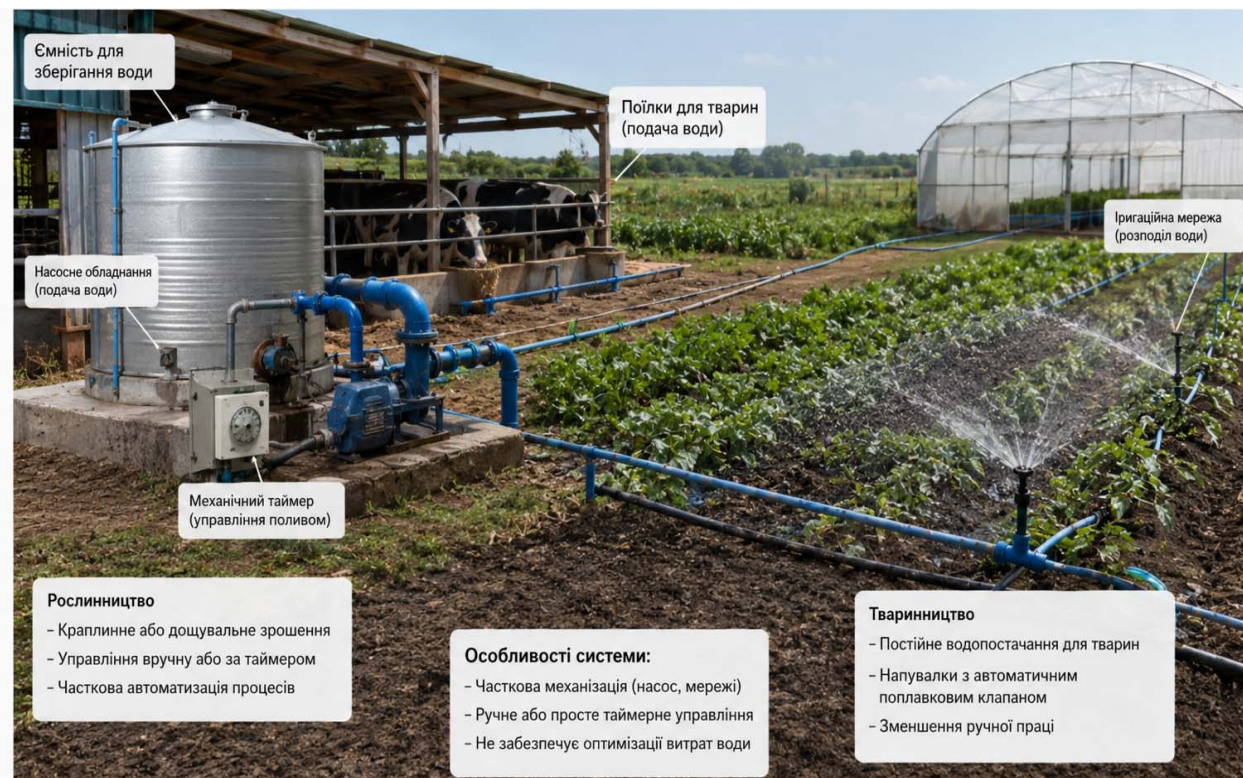


Рисунок 1.3- Система водопостачання фермерського господарства з частковою автоматизацією

Системи автоматизованого управління водопостачанням і зрошенням являють собою комплекс технічних засобів, що забезпечують безперервний контроль, регулювання та оптимізацію процесів подачі води відповідно до попередньо заданих алгоритмів роботи. Основу таких систем складають програмовані логічні контролери, датчики контролю параметрів середовища та виконавчі механізми, які взаємодіють між собою через комунікаційні мережі та забезпечують автоматичне прийняття рішень без постійного втручання оператора. Основною метою впровадження подібних систем є підвищення ефективності використання водних ресурсів, зменшення

енергоспоживання, забезпечення стабільності технологічних процесів та підвищення врожайності сільськогосподарських культур (рисунок 1.4).

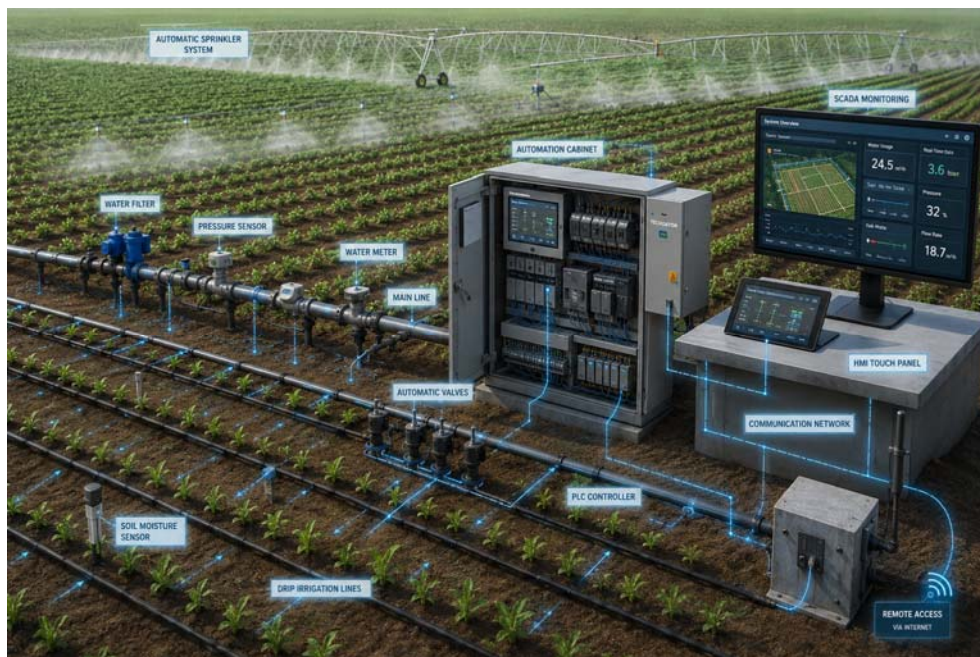


Рисунок 1.4- Автоматизована SCADA система автоматизації водопостачання фермерського господарства

До складу автоматизованих систем водопостачання входять датчики вологості ґрунту, температури, тиску та витрати води, які в режимі реального часу здійснюють моніторинг стану системи та передають отримані дані до центрального контролера. На основі аналізу цих даних програмований логічний контролер формує сигнали керування для насосного обладнання, електромагнітних клапанів, дощувальних установок або крапельних ліній. Завдяки цьому забезпечується автоматичне регулювання подачі води залежно від погодних умов, рівня вологості ґрунту, часу доби або заданих агротехнічних параметрів.

Одним із найбільш поширених різновидів таких систем є системи крапельного зрошення з таймерним або інтелектуальним управлінням. Вони забезпечують локальну подачу води безпосередньо до кореневої системи рослин через мережу трубопроводів і крапельних ліній (рисунок 1.4). Автоматизація процесу дозволяє точно дозувати об'єм води, мінімізувати

втррати через випаровування та забезпечити рівномірне зволоження ґрунту. Сучасні системи можуть працювати за заздалегідь встановленими графіками або адаптувати режими зрошення відповідно до показників датчиків вологості.

Широко застосовуються також автоматичні дощувальні установки, які здійснюють рівномірне розпилення води над поверхнею поля. Такі системи використовуються для зрошення великих площ сільськогосподарських угідь, спортивних майданчиків та зелених зон. Управління роботою дощувальних машин виконується за допомогою контролерів, які координують запуск насосів, регулювання тиску та послідовність роботи окремих зон поливу. Це забезпечує оптимальний режим водопостачання та знижує ризик перезволоження або пересихання ґрунту. Найбільш функціональними є системи, побудовані на базі програмованих логічних контролерів (ПЛК) та SCADA-систем. (рисунок 1.5).

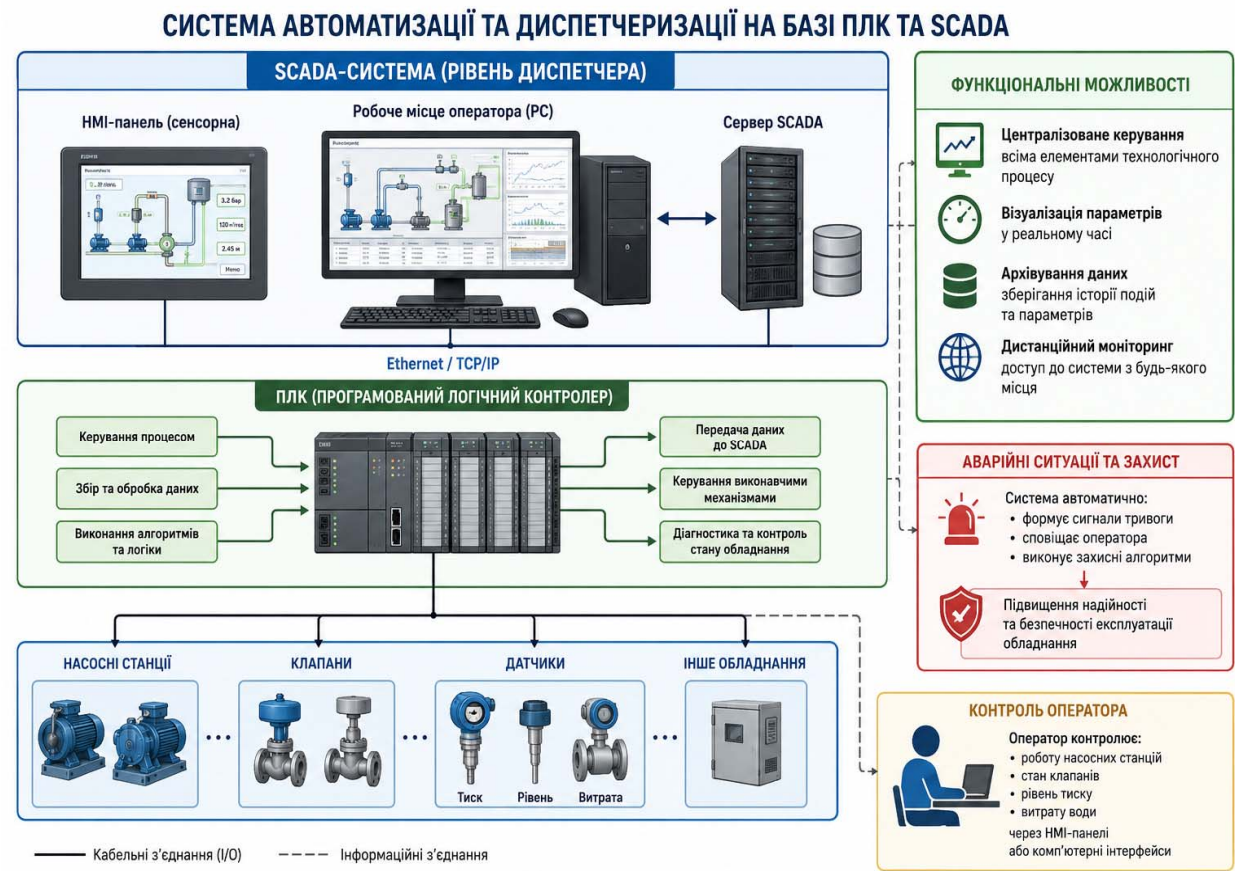


Рисунок 1.5- SCADA система забезпечення водопостачанням фермерського господарства

Такі рішення забезпечують централізоване керування всіма елементами технологічного процесу, візуалізацію параметрів у реальному часі, архівування даних та дистанційний моніторинг. Оператор може контролювати роботу насосних станцій, стан клапанів, рівень тиску та витрату води через сенсорні HMI-панелі або комп'ютерні інтерфейси. У разі виникнення аварійних ситуацій система автоматично формує сигнали тривоги та виконує захисні алгоритми, що підвищує надійність і безпечність експлуатації обладнання.

Використання автоматизованих систем водопостачання та зрошення є важливим напрямом розвитку сучасного агропромислового комплексу, оскільки дозволяє поєднати високий рівень продуктивності з раціональним використанням природних ресурсів і мінімізацією впливу людського фактора на технологічний процес.

Стрімкий розвиток цифрових технологій відкриває принципово нові можливості для побудови систем водопостачання фермерських господарств. Сучасні підходи базуються на концепції точного землеробства (Precision Agriculture), яка передбачає управління виробничими процесами з урахуванням просторової та часової мінливості умов вирощування культур.

Інтернет речей (IoT) забезпечує підключення фізичних пристроїв — датчиків, виконавчих механізмів, насосів, клапанів — до єдиної мережі з можливістю обміну даними в реальному часі. Типова IoT-архітектура системи водопостачання включає три рівні: рівень збору даних (польові сенсори), рівень передачі даних (бездротові мережі LoRaWAN, NB-IoT, ZigBee) та рівень обробки і управління (хмарна платформа або локальний сервер)(рисунок 1.6).

Датчики вологості ґрунту є ключовим елементом IoT-системи. Сучасні емнісні датчики вологості забезпечують точність вимірювання об'ємної вологості ґрунту в межах $\pm 1-3\%$. Їх розміщення на кількох глибинах (10, 20, 40 та 60 см) дозволяє отримати повний профіль вологозабезпечення кореневої системи.

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

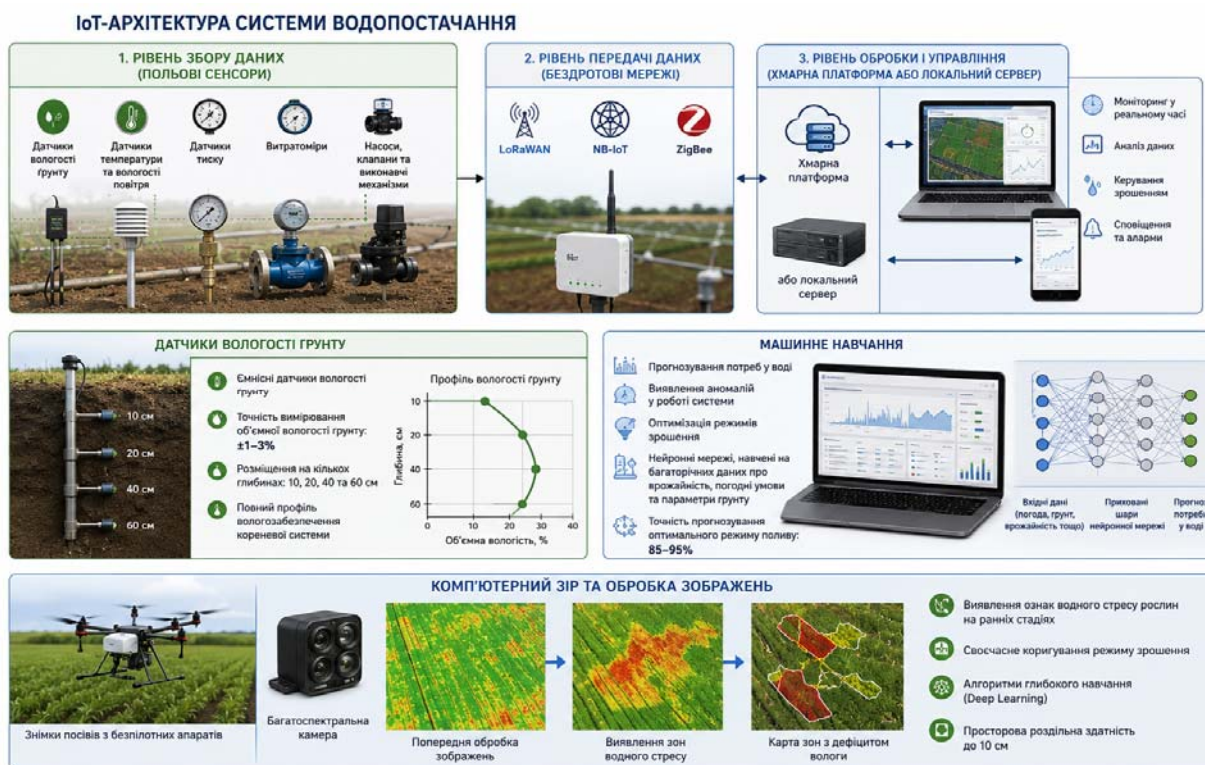


Рисунок 1.6- IoT архітектура системи водопостачання фермерського господарства

Алгоритми «машинного навчання знаходять широке застосування в задачах прогнозування потреб у воді, виявлення аномалій у роботі системи та оптимізації режимів зрошення. Нейронні мережі, навчені на багаторічних даних про врожайність, погодні умови та параметри ґрунту, здатні прогнозувати оптимальний режим поливу з точністю 85–95%» [7].

Методи обробки зображень на базі комп'ютерного зору дозволяють аналізувати знімки посівів з безпілотних апаратів для виявлення ознак водного стресу рослин на ранніх стадіях, що дозволяє своєчасно коригувати режим зрошення. Застосування алгоритмів глибокого навчання (Deep Learning) у поєднанні з багатоспектральними камерами забезпечує виявлення зон з дефіцитом вологи з просторовою роздільною здатністю до 10 см.

Хмарні обчислення забезпечують централізоване зберігання та обробку великих масивів агрономічних даних, доступ до системи управління з будь-якого пристрою через веб-браузер або мобільний додаток, масштабованість

інформаційної інфраструктури та можливість інтеграції з зовнішніми сервісами — метеорологічними службами, ринками збуту, системами бухгалтерського обліку.

Провідні технологічні компанії пропонують спеціалізовані агрономічні платформи: John Deere Operations Center, Climate FieldView, Trimble Ag Software, вітчизняні розробки на базі платформ Microsoft Azure та Amazon AWS. Ці платформи забезпечують не лише управління зрошенням, а й комплексне планування агровиробничих процесів.

Комплексне «застосування сучасних технологій IoT, штучного інтелекту, хмарних обчислень та прецизійного землеробства дозволяє кардинально підвищити ефективність систем водопостачання фермерських господарств. Роль сучасних засобів виявляється у декількох ключових аспектах.

По-перше, перехід від управління за розкладом до управління за станом. Традиційні системи здійснюють полив згідно з попередньо встановленим розкладом, незалежно від реального стану ґрунту та рослин. Сучасні IoT-системи дозволяють здійснювати полив тоді і в тій кількості, коли це дійсно необхідно, на основі даних сенсорів у реальному часі. Дослідження, проведені в США та Ізраїлі, показали, що такий підхід дозволяє знизити водоспоживання на 25–45% при збереженні або підвищенні врожайності» [9].

По-друге, прогностичне управління на основі Big Data. Аналіз великих масивів агрономічних даних дозволяє виявляти закономірності, недоступні традиційним методам аналізу. Алгоритми машинного навчання, навчені на даних про погоду, ґрунт, фенологічні фази розвитку культур та результати врожаю попередніх сезонів, забезпечують оптимізацію режимів зрошення з урахуванням усіх суттєвих факторів.

По-третє, інтеграція в єдину цифрову екосистему господарства. Сучасні платформи управління агровиробництвом дозволяють інтегрувати систему водопостачання з іншими підсистемами господарства — системами

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

точного внесення добрив, захисту рослин, управління технікою. Це забезпечує комплексну оптимізацію всіх виробничих процесів та значно підвищує ефективність використання ресурсів.

По-четверте, підвищення енергетичної ефективності. Оптимізація роботи насосного обладнання за допомогою частотних перетворювачів та алгоритмів управління на базі AI дозволяє знизити споживання електроенергії на 20–35%. Інтеграція з системами альтернативної енергетики (сонячними панелями, вітрогенераторами) забезпечує енергетичну автономність господарства.

Таким чином, сучасні технологічні засоби відіграють визначальну роль у трансформації систем водопостачання фермерських господарств — від простих автоматизованих систем управління до інтелектуальних платформ точного зрошення, що забезпечують максимальну ефективність використання водних ресурсів при мінімальних витратах праці та енергії.

1.3 Постановка задачі розробки автоматизованої системи водопостачання фермерського господарства

Сучасні фермерські господарства потребують ефективних систем водопостачання, здатних забезпечувати стабільну подачу води для зрошення сільськогосподарських культур, технічних потреб та підтримання оптимальних умов виробництва. В умовах інтенсивного розвитку аграрного сектору та зростання потреб у раціональному використанні природних ресурсів особливої актуальності набуває питання автоматизації процесів управління водними ресурсами. Забезпечення безперервного та контрольованого водопостачання є одним із ключових факторів підвищення врожайності сільськогосподарських культур, покращення якості продукції та зниження експлуатаційних витрат фермерського господарства.

Традиційні методи «керування водопостачанням, що базуються на ручному контролі та періодичному втручанні обслуговуючого персоналу, характеризуються значними витратами водних ресурсів, високою залежністю

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

від людського фактора та недостатньою оперативністю реагування на зміну параметрів технологічного процесу. Ручне керування насосним обладнанням та системами поливу не дозволяє забезпечити необхідну точність регулювання, що часто призводить до нерівномірного розподілу води, перевитрат електроенергії та виникнення аварійних ситуацій. Крім того, відсутність постійного моніторингу параметрів системи ускладнює своєчасне виявлення несправностей і знижує загальну ефективність роботи водогосподарського комплексу» [8].

У зв'язку з цим актуальним є впровадження автоматизованих систем управління, які забезпечують безперервний моніторинг та автоматичне регулювання процесів подачі води. Використання сучасних засобів автоматизації дозволяє значно підвищити точність керування технологічними процесами, забезпечити стабільність роботи обладнання та мінімізувати втрати водних ресурсів. Автоматизовані системи здатні функціонувати в режимі реального часу, оперативно реагуючи на зміну зовнішніх умов, показників вологості ґрунту, тиску в трубопроводах або рівня води в резервуарах.

Основною задачею розробки автоматизованої системи водопостачання фермерського господарства є створення комплексу технічних і програмних засобів, здатних забезпечити ефективне, надійне та економічне управління процесами водопостачання та зрошення. Така система повинна поєднувати засоби збору інформації, програмовані логічні контролери, виконавчі механізми та програмне забезпечення для централізованого управління всіма елементами технологічного процесу. Головною вимогою до системи є забезпечення автоматичного підтримання необхідних параметрів роботи без постійного втручання оператора.

Система повинна «здійснювати автоматичний контроль параметрів роботи обладнання, аналізувати дані від датчиків, формувати керуючі сигнали та забезпечувати підтримання заданих режимів функціонування. Для цього необхідно реалізувати алгоритми автоматичного керування насосами,

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електромагнітними клапанами, виконавчими механізмами та системами розподілу води. Робота системи має базуватися на принципах адаптивного управління, за яких режими функціонування можуть змінюватися залежно від поточних умов навколишнього середовища та технологічних потреб господарства» [9].

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити ряд взаємопов'язаних задач. Насамперед потрібно забезпечити автоматичний збір інформації про стан системи за допомогою датчиків вологості ґрунту, тиску, рівня та витрати води. Використання датчиків дозволяє отримувати достовірні дані про стан технологічного процесу та забезпечувати високий рівень точності управління. Отримані дані мають передаватися до програмованого логічного контролера, який виконуватиме обробку інформації та прийняття рішень відповідно до закладених алгоритмів керування.

Однією з ключових функцій системи є автоматичне керування насосним обладнанням, електромагнітними клапанами та виконавчими механізмами залежно від поточних параметрів технологічного процесу. У випадку зниження рівня вологості ґрунту система повинна автоматично активувати подачу води до відповідної зони поливу, а після досягнення встановлених параметрів — припиняти зрошення. Подібний підхід дозволяє оптимізувати використання водних ресурсів та уникнути надмірного споживання електроенергії.

Важливим завданням є «реалізація режимів автоматичного та дистанційного управління системою. Для цього необхідно передбачити використання операторської панелі НМІ та SCADA-системи, що забезпечуватимуть візуалізацію параметрів роботи обладнання в реальному часі, архівування даних, формування аварійних повідомлень та можливість оперативного втручання оператора у роботу системи. Використання SCADA-систем дозволяє здійснювати централізований контроль роботи насосних

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

станцій, трубопроводів і систем зрошення, а також проводити аналіз ефективності функціонування обладнання» [10].

Крім того, система повинна підтримувати можливість інтеграції із сучасними IoT-технологіями для дистанційного моніторингу через мережу Інтернет. Це дозволить оператору отримувати доступ до інформації про стан системи з будь-якого місця за допомогою комп'ютера або мобільного пристрою. Використання бездротових технологій передачі даних та хмарних сервісів забезпечує підвищення мобільності та оперативності управління системою водопостачання.

У процесі розробки автоматизованої системи необхідно забезпечити високу надійність і безпеку її функціонування. Для цього мають бути реалізовані алгоритми аварійного захисту обладнання у випадку перевищення допустимого тиску, відсутності води, несправності насосів або обриву зв'язку з датчиками. Система повинна автоматично реагувати на аварійні ситуації, виконуючи відключення обладнання або переведення його в безпечний режим роботи. Також необхідно передбачити резервування критично важливих елементів системи для забезпечення безперервності технологічного процесу.

Особливу увагу необхідно приділити енергоефективності системи. Оптимізація режимів роботи насосного обладнання, автоматичне регулювання тиску та використання частотних перетворювачів дозволяють значно знизити споживання електроенергії та підвищити економічну ефективність експлуатації системи. Раціональне використання водних ресурсів також сприяє зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище та відповідає сучасним вимогам екологічної безпеки.

Отже, постановка задачі розробки автоматизованої системи водопостачання фермерського господарства полягає у створенні інтелектуальної системи керування, яка забезпечить автоматичний контроль та регулювання процесів водопостачання, підвищить ефективність використання ресурсів, знизить експлуатаційні витрати та забезпечить

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стабільну роботу технологічного обладнання в умовах сучасного аграрного виробництва. Впровадження такої системи дозволить підвищити рівень автоматизації фермерського господарства, забезпечити стабільність виробничих процесів та створити умови для ефективного функціонування агропромислового комплексу в цілому.

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПОНЕНТІВ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВОДОПОСТАЧАННЯ ФЕРМЕРСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

2.1. Аналіз та вибір програмованого логічного контролера для системи автоматизованого водопостачання фермерського господарства

Програмований логічний контролер (ПЛК) є центральним елементом будь-якої сучасної системи автоматизації водопостачання. Відповідно до стандарту МЕК 61131-1, ПЛК – це цифровий електронний пристрій, що має програмовану пам'ять для зберігання алгоритмів керування і призначений для управління машинами та технологічними процесами через цифрові або аналогові входи/виходи.

У контексті автоматизованих систем водопостачання (АСУВ) фермерського господарства ПЛК виконує такі ключові функції: збір та обробку сигналів від датчиків тиску, рівня, витрати та якості води; реалізацію алгоритмів ПІД-регулювання тиску у водопровідній мережі; управління роботою насосних агрегатів та електромагнітних клапанів; формування аварійних сигналів та захист обладнання; обмін даними з верхнім рівнем управління (HMI, SCADA, IoT-платформа) (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1- Структурна схема взаємодії ПЛК системи водопостачання фермерського господарства з компонентами системи

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

ПЛК «займає проміжний рівень між польовими пристроями (насосними станціями, клапанами, датчиками) та рівнем диспетчеризації (SCADA-сервер, HMI-панель, робоче місце оператора). Система функціонує за схемою: датчики тиску, рівня та витрати передають аналогові (4–20 мА) та цифрові (RS-485) сигнали на входи ПЛК, який обробляє їх за запрограмованими алгоритмами і формує керуючі впливи на виконавчі механізми.

На сучасному ринку промислової автоматики представлено широкий спектр контролерів, придатних для використання у системах водопостачання фермерських господарств. За класифікацією виробників та ціновими категоріями їх можна розподілити на три групи: промислові ПЛК преміум-класу (Siemens, Rockwell Automation), ПЛК середнього класу (Schneider Electric, Unitronics, VIPA) та мікроконтролерні рішення (Arduino, ESP32)» [11].

Рисунок 2.2 ілюструє структуру застосування різних типів засобів автоматизації водопостачання у провідних галузях аграрного виробництва України.

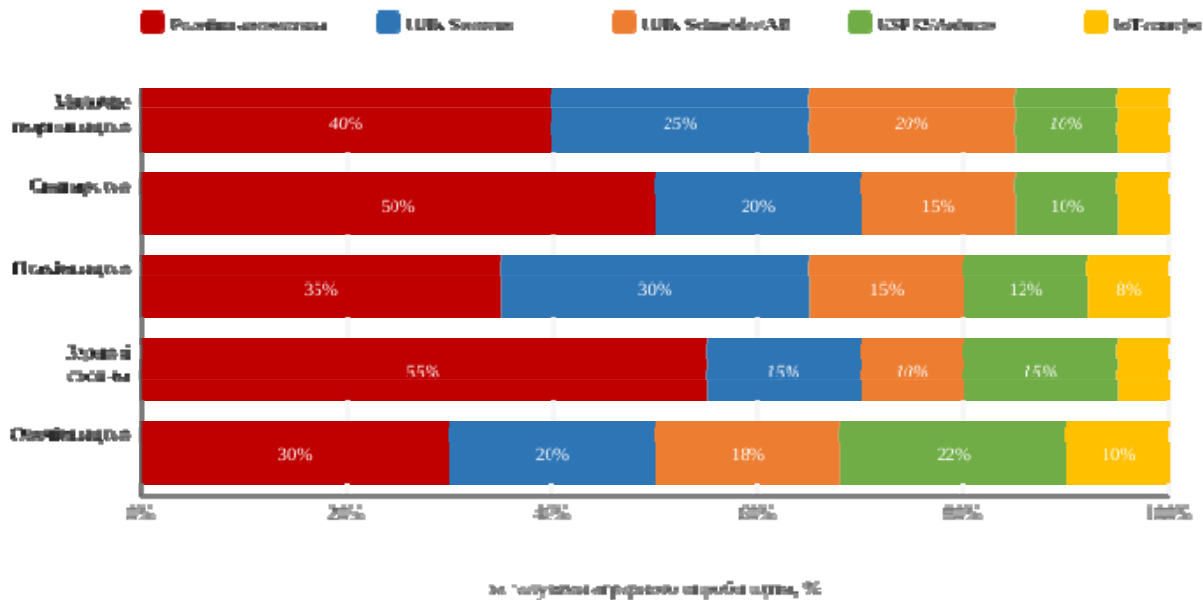


Рисунок 2.2- Структура застосування різних типів засобів автоматизації водопостачання у провідних галузях аграрного виробництва України.

Siemens S7-1200 (рисунок 2.3) є «флагманською моделлю серед ПЛК для малої та середньої автоматизації. Контролер оснащений процесором з частотою 75 МГц, підтримує до 16 аналогових входів (розширення) та має вбудований PROFINET-інтерфейс. Для програмування використовується середовище TIA Portal, що підтримує всі п'ять мов стандарту MEK 61131-3 (LAD, FBD, STL, SFC, SCL). Висока вартість (350–600 USD) обмежує його застосування у малих господарствах» [12].



Рисунок 2.3- Siemens S7-1200

«Siemens LOGO! 8 (рисунок 2.4)– компактний логічний модуль, орієнтований на нескладні задачі автоматизації. Підтримує програмування через LOGO! Soft Comfort та має вбудований Ethernet-інтерфейс для інтеграції з хмарними сервісами LOGO! Cloud. Недоліком є обмежена кількість I/O (без розширення) та слабша обчислювальна потужність» [13].



Рисунок 2.4- Siemens LOGO! 8

«Schneider Electric Modicon M241 (рисунок 2.5) відрізняється розширеними комунікаційними можливостями (підтримка CAN, Modbus

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

RTU/TCP, EtherNet/IP) та широким діапазоном модулів розширення. Програмується у середовищі SoMachine (EcoStruxure), що підтримує стандарт МЕК 61131-3» [14].



Рисунок 2.5- Schneider Electric Modicon M241

«ESP32 (рисунок 2.6) – двоядерний мікроконтролер компанії Espressif Systems з вбудованими WiFi та Bluetooth модулями. Завдяки значно нижчій вартості (15–35 USD) та розвиненій екосистемі (Arduino IDE, ESP-IDF, MicroPython) здобув широке поширення у DIY-проектах та малосерійних комерційних рішеннях. 18 аналогових входів (12-бітний АЦП), апаратний Modbus RTU через RS-485 та підтримка MQTT/HTTP роблять ESP32 повноцінним контролером для систем водопостачання малих господарств» [15].



Рисунок 2.6- ESP32

Для системного порівняння розглянутих контролерів виконано багатокритеріальну оцінку за чотирма технічними показниками: швидкодія (обчислювальна потужність процесора), ємність пам'яті, кількість аналогових

каналів I/O та комунікаційні можливості, що представлені в Таблиці 2.1. Оцінка проводилась за 10-бальною шкалою.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики провідних ПЛК для систем водопостачання [16]

Параметр	Siemens S7-1200	Siemens LOGO! 8	Schneider M241	ESP32 DevKit
Процесор	ARM Cortex 75МГц	ARM 20МГц	ARM 80МГц	Tensilica 240МГц
Пам'ять (RAM)	100 кБ	16 кБ	64 кБ	520 кБ
Flash / ROM	1 МБ	400 кБ	512 кБ	4 МБ
Цифр. DI/DO	14/10	8/4	24/16	34/34
Аналог. AI/AO	2AI+2AO	4AI	4AI+2AO	18AI(126)/0AO
Інтерфейси	PROFINET/Modbus	Ethernet/Mod	Modbus RTU/TCP	WiFi/BLE/RS-485
Ступінь захисту	IP20	IP20	IP20	—
Діап. живлення	24 VDC	12–24VDC	24 VDC	3,3–5 V
Темп. роботи	–20...+60°C	–20...+55°C	–25...+60°C	–40...+85°C
Вартість, USD	350–600	180–250	220–350	15–35

Аналіз рисунка 2.7 виявляє, що за комунікаційними можливостями лідерство утримують ESP32 та Siemens S7-1200, тоді як за надійністю та промисловими стандартами переваги на боці Siemens та Schneider. Siemens LOGO! 8 та Arduino Mega отримують найнижчі сумарні оцінки через обмежену пам'ять та малу кількість комунікаційних інтерфейсів.

На підставі порівняльного аналізу та відповідності сформованим технічним вимогам для реалізації проектованої АСУВ обрано

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

мікроконтролер ESP32 DevKit v1 як основний обчислювальний елемент з доповненням модулем розширення на базі MAX485 для реалізації інтерфейсу RS-485 (Modbus RTU).

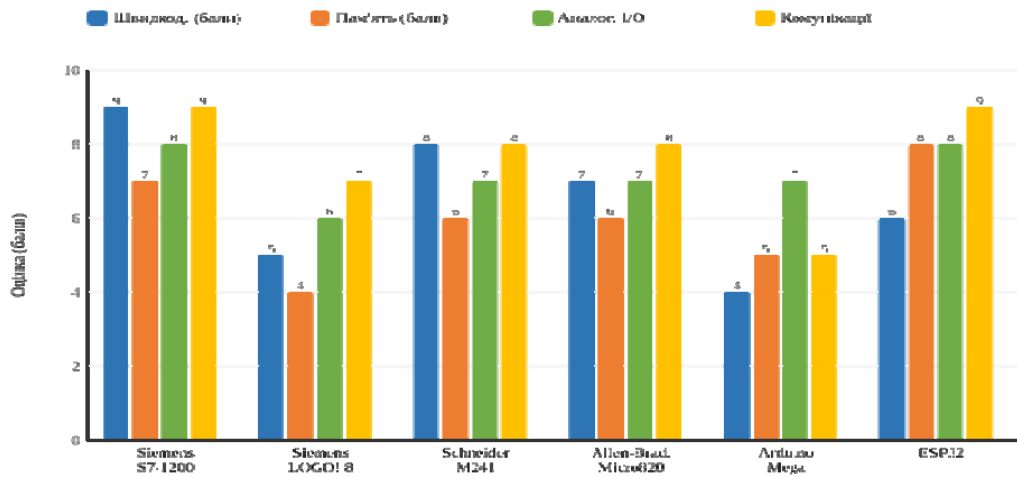


Рисунок 2.7- Порівняння характеристик контролерів за критеріями

Для реалізації повноцінного промислового рівня надійності систему на базі ESP32 рекомендується доповнити: модулем захисту живлення (TVS-діоди, фільтри), схемою watchdog-таймера на базі TPL5110, ізолятором RS-485 (MAX485 з гальванічною розв'язкою ADUM1201) та корпусом IP54 для монтажу у шафі управління.

«Функціональну схему підключення ESP32 до периферійних пристроїв АСУВ описує математична модель розподілу виводів (pinout), де кожен GPIO-вивід виконує строго визначену функцію відповідно до вимог до часових параметрів та електричних характеристик сигналу. Часовий цикл виконання основної програми $T_{\text{цикл}}$ розраховується як:

$$T_{\text{цикл}} = T_{\text{ADC}} \cdot N_{\text{ch}} + T_{\text{PID}} + T_{\text{Modbus}} + T_{\text{MQTT}}, \quad (2.1)$$

де T_{ADC} – час перетворення АЦП ($T_{\text{ADC}} \approx 2$ мс на канал); N_{ch} – кількість аналогових каналів ($N_{\text{ch}} = 4$); T_{PID} – час виконання алгоритму ПІД-регулятора ($T_{\text{PID}} \approx 0,5$ мс); T_{Modbus} – час обміну по Modbus RTU ($T_{\text{Modbus}} \approx 10$ мс при 9600 бод, 8 регістрів); T_{MQTT} – час публікації даних на брокер ($T_{\text{MQTT}} \approx 5\text{--}30$ мс при стабільному WiFi-з'єднанні) » [16].

Таким чином, загальний час циклу становить:

$$T_{\text{цикл}} = 2 \cdot 4 + 0,5 + 10 + 20 = 38,5 \text{ мс} \approx 40 \text{ мс}, \quad (2.2)$$

що задовольняє вимогу $T_{\text{цикл}} \leq 100 \text{ мс}$. При цьому використання FreeRTOS (вбудована ОС ESP32) дозволяє розподілити задачі між двома ядрами: ядро 0 – управління насосом та ПІД-регулювання (пріоритет High), ядро 1 – комунікації WiFi/Modbus та логування (пріоритет Normal).

Проведений аналіз та порівняння програмованих логічних контролерів для систем автоматизованого водопостачання фермерських господарств дозволяє зробити наступні висновки:

1. На ринку промислової автоматики для аграрного сектору представлено широкий спектр контролерів: від промислових ПЛК (Siemens S7-1200, Schneider M241) вартістю 200–600 USD до мікроконтролерних рішень (ESP32, Arduino) вартістю 15–80 USD. Вибір оптимального рішення визначається балансом між технічними вимогами та економічними обмеженнями конкретного господарства.

2. За результатами багатокритеріального аналізу найкраще співвідношення «ціна–функціональність» для малих та середніх фермерських господарств демонструє мікроконтролер ESP32 DevKit v1, який відповідає всім сформованим технічним вимогам (оцінка 7/7) при вартості в 10–20 разів нижчій, ніж промислові аналоги.

2.2. Дослідження компонентів системи забору, транспортування, накопичення та розподілу води фермерського господарства

Сучасна система водопостачання фермерського господарства є складним багатоланковим комплексом, у якому кожен вузол виконує чітко визначену функцію. Відповідно до концепції автоматизованого керування, систему можна розглядати як чотири послідовні підсистеми: водозабір, транспортування, накопичення та розподіл. Кожна з цих підсистем є одночасно об'єктом управління та джерелом вимірювальної інформації.

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Системи водопостачання фермерського господарства, охоплює всі основні компоненти: водозабірний вузол зі свердловиною, насосну станцію першого підйому, магістральний трубопровід з датчиками тиску та витрати, водонапірний бак-накопичувач з датчиком рівня, розподільні вузли з керованими клапанами та споживачів (житловий будинок, тваринницький комплекс, теплиця, система зрошення поля).

«Центральним елементом управління є шафа автоматизації з ПЛК-контролером (рисунок 2.8), яка отримує сигнали від усіх датчиків (тиск, витрата, рівень) та формує керуючі впливи на насосні агрегати та електроприводні клапани. Зв'язок з SCADA-системою здійснюється по каналу передачі даних (Modbus TCP / WiFi). Така архітектура відповідає ієрархічній моделі управління АСУВ і дозволяє реалізувати повний цикл автоматичного регулювання параметрів водопостачання» [17].



Рисунок 2.8- Шафа з промисловим ПЛК

Баланс водовтрат по кожному етапу системи (рисунок 2.7) показує, що сумарні втрати між водозабором та споживачами становлять 24% від підйому, з яких найбільша частка припадає на трубопровідну мережу (8%) та водозабірний вузол (5%).

На рисунку 2.9 проведено аналіз підтверджує пріоритетність мінімізації втрат у розподільній мережі та підвищення ефективності насосної

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

станції першого підйому як основних напрямів підвищення загальної ефективності системи.

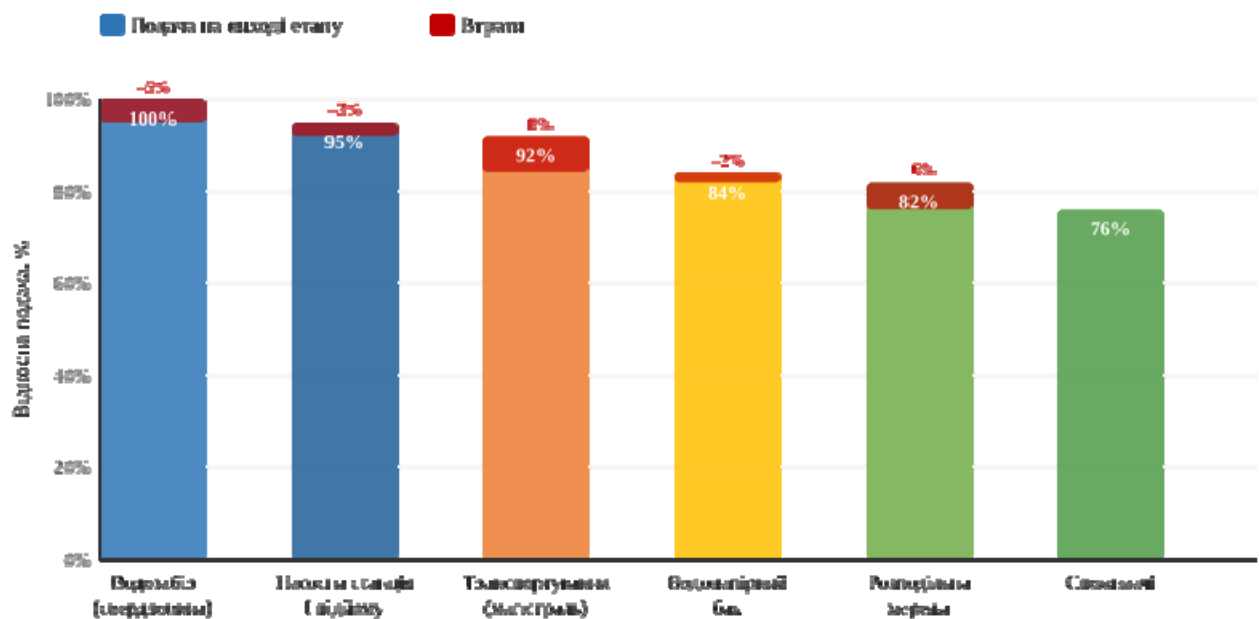


Рисунок 2.9-Баланс водовтрат по етапах системи водопостачання

Водозабірний вузол (рисунок 2.10) є початковою ланкою системи водопостачання. Для більшості фермерських господарств України основним джерелом водопостачання слугують артезіанські або ґрунтові свердловини глибиною від 20 до 120 м. Вибір типу свердловини визначається геологічними умовами ділянки та необхідним дебітом.



Рсунок 2.10- Водозабірний вузол Grundfos SP 17-8

Пропускна спроможність свердловини Q_{св} визначається за формулою Дюпюї для усталеного притоку до досконалої свердловини:

$$Q_{св} = \pi \cdot k \cdot (H_{\square}^2 - h_w^2) / \ln(R/r_{св}), \tag{2.3}$$

де k – коефіцієнт фільтрації водоносного горизонту, м/добу; H_0 – природна потужність водоносного горизонту, м; h_w – рівень води у свердловині при закачуванні, м; R – радіус впливу свердловини, м; $r_{св}$ – радіус свердловини, м.

Насосна станція першого підйому забезпечує підйом води зі свердловини до водонапірного баку або безпосередньо у магістральний трубопровід. Для вертикальних свердловинних насосів типових фермерських об'єктів застосовуються занурювальні відцентрові насосні агрегати типу ЕЦВ, Grundfos SP або Pedrollo 4SR, які встановлюються безпосередньо у стовбурі свердловини. Характеристики таких водозабірних вузлів представлено у Таблиці 2.2

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики типових свердловинних насосів для АСУВ

Модель	Подача Q, м³/год	Напір Н, м	Потужність, кВт	ККД η , %	Діаметр, мм
ЕЦВ 6-16-110	16	110	7,5	68	140
Grundfos SP 17-8	17	80	5,5	74	98
Pedrollo 4SR 10/9	10	95	4,0	71	98
Wilo Sub TWI 4-24	8	75	3,0	72	95
Ebara 3GS 32/10	12	85	4,5	70	105

Характеристика Q–Н насоса та системи (рисунок 2.11) є ключовим інструментом для визначення робочої точки насосного агрегату та оцінки ефективності його роботи у конкретній гідравлічній схемі.

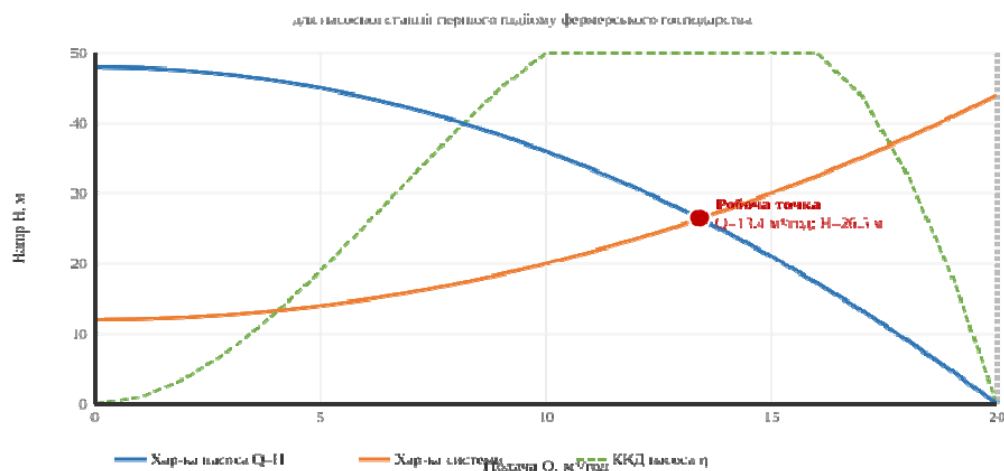


Рисунок 2.11- Характеристики Q-H насоса, системи та ККД

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

З рисунка 2.11 видно, що робоча точка насосного агрегату знаходиться при $Q = 13,4 \text{ м}^3/\text{год}$, $H = 26,5 \text{ м}$, що відповідає зоні максимального ККД ($\eta \approx 72\%$). Відхилення від цієї точки внаслідок зміни споживання призводить до зниження ефективності насоса, що є обґрунтуванням для застосування частотно-регульованого привода (ЧРП). При роботі з ЧРП характеристика насоса зміщується вниз при зниженні частоти, забезпечуючи збереження оптимального ККД в ширшому діапазоні навантажень.

Технічні засоби автоматизації водозабірної вузла включають: занурювальний поплавковий або гідростатичний датчик рівня у свердловині (для захисту від «сухого ходу»), датчик тиску на напірному патрубку насоса (4–20 мА, діапазон 0–10 бар), блок захисту двигуна від перевантажень та неправильного чергування фаз, а також перетворювач частоти для плавного управління швидкістю насоса, що представлено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Технічні засоби автоматизації насосної станції першого підйому

Компонент	Тип / Модель	Технічні характеристики	Функція в системі
Насос свердловинний	Grundfos SP 17-8	$Q=17 \text{ м}^3/\text{год}$, $H=80 \text{ м}$, $P=5,5 \text{ кВт}$	Підйом води зі свердловини
Перетворювач частоти	Danfoss VLT 2800	0,75–37 кВт, вх. 380В 3ф	Плавне регулювання Q насоса
Датчик тиску нагн.	Wika S-20	0–10 бар, 4–20 мА, IP65	Контроль тиску насоса
Датч. рівня свердл.	Hydrostatic 2000	0–100 м вод. ст., 4–20 мА	Захист від «сухого ходу»
Блок захисту двиг.	Schneider LR2D35	Регул. від 30 до 50 А	Теплов. захист насосного дв.
Магн. пускач	Siemens 3RT2027	25 А, 400 В	Комутація живлення насоса

«Частотний перетворювач Danfoss VLT 2800 (рисунк 2.12) виконує важливу функцію в системі водопостачання фермерського господарства, забезпечуючи ефективне керування електродвигунами насосного обладнання. Основне призначення пристрою полягає у плавному регулюванні швидкості обертання двигуна залежно від поточної потреби у

воді, що дозволяє підтримувати необхідний тиск у трубопроводах та оптимізувати роботу насосної станції» [20].



Рисунок 2.12- Частотний перетворювач Danfoss VLT 2800

У системах водопостачання, які обслуговують одночасно рослинницькі та тваринницькі об'єкти, споживання води є нерівномірним і змінюється протягом доби. Використання перетворювача частоти дає можливість автоматично адаптувати продуктивність насоса до фактичного навантаження, уникаючи роботи обладнання на максимальній потужності в періоди низького водоспоживання. Завдяки цьому зменшуються втрати електроенергії та підвищується загальна енергоефективність системи.

Додатковою перевагою Danfoss VLT 2800 є забезпечення плавного пуску та зупинки насосів. Це дозволяє мінімізувати гідравлічні удари в трубопроводах, зменшити механічне навантаження на двигуни, запірну арматуру та трубопровідну мережу, а також продовжити термін експлуатації обладнання. Крім того, пристрій підтримує інтеграцію з датчиками тиску, рівня води та програмованими логічними контролерами, що робить його важливим елементом автоматизованої системи управління водопостачанням.

«Датчик тиску WIKA S-20 (рисунок 2.13) використовується в автоматизованій системі водопостачання фермерського господарства для безперервного контролю тиску в трубопровідній мережі. Отримані дані передаються до програмованого логічного контролера, де використовуються як сигнал зворотного зв'язку для ПІД-регулювання продуктивності насосної станції. Використання датчика дозволяє підтримувати стабільний тиск води

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

для всіх споживачів, підвищити енергоефективність системи та забезпечити захист обладнання від аварійних режимів роботи» [21].



Рисунок 2.13- Датчик тиску WIKA S-20

«Датчик Hydrostatic 2000 (рисунок 2.14) забезпечує оперативний моніторинг запасів води та передає отримані дані до контролера або системи диспетчеризації. Це дозволяє автоматично керувати роботою насосного обладнання, підтримувати необхідний рівень води в резервуарах і запобігати роботі насосів «всуху». Завдяки високій точності вимірювань покращує стабільне функціонування системи» [22]



Рисунок 2.14- Hydrostatic 2000

«Використання Hydrostatic 2000 особливо актуальне для фермерських господарств із розгалуженими системами зрошення та значними обсягами споживання води. Автоматизований контроль рівня води дає змогу ефективно виявляти відхилення від заданих параметрів, оптимізувати режими роботи насосних станцій та зменшити витрати електроенергії. Це надійність надійного водопостачання сільськогосподарських об'єктів і забезпечує безперервне постачання води для технологічних потреб господарства» [23].

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

«Одним із важливих елементів захисту електропривода насосної станції в автоматизованій системі водопостачання фермерського господарства є теплове реле перевантаження Schneider Electric LR2D35 (рисунок 2.15). Даний пристрій призначений для захисту трифазних електродвигунів від тривалих перевантажень, перегріву обмоток та аварійних режимів роботи, які можуть виникати під час експлуатації насосного обладнання. Реле належить до серії TeSys D та використовується спільно з магнітними контакторами для створення комплексної системи керування і захисту електродвигуна» [24].



Рисунок 2.15- Реле перевантаження Schneider Electric LR2D35

У системі водопостачання фермерського господарства насосний агрегат забезпечує подачу води від свердловини до резервуара-накопичувача та подальше транспортування до споживачів. Під час роботи насоса можуть виникати перевантаження, спричинені підвищеним гідравлічним опором мережі, заклинюванням робочого колеса, засміченням трубопроводів або відхиленням параметрів електромережі. За таких умов струм електродвигуна перевищує номінальне значення, що призводить до інтенсивного нагрівання обмоток і скорочення ресурсу обладнання.

Для запобігання пошкодженню двигуна теплове реле LR2D35 [24] здійснює безперервний контроль струму навантаження. При перевищенні встановленого значення реле автоматично формує сигнал відключення контактора та знеструмлює електродвигун насоса. Таким чином забезпечується захист обладнання від перегріву та передчасного виходу з

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

ладу. Реле також здатне реагувати на асиметрію фаз і зникнення однієї з фаз живлення, що є особливо важливим для трифазних насосних установок.

Одним із ключових комутаційних елементів автоматизованої системи водопостачання фермерського господарства є контактор Siemens 3RT2027[25] (рисунок 2.16). Даний пристрій призначений для керування електродвигуном насосного агрегату шляхом багаторазового дистанційного вмикання та вимикання силового кола відповідно до команд, сформованих програмованим логічним контролером або системою диспетчерського керування.

У структурі системи водопостачання контактор встановлюється в шафі автоматизації та входить до складу силового кола електропривода насоса. Після отримання сигналу від контролера на котушку контактора подається керуюча напруга, внаслідок чого відбувається замикання головних контактів і підключення трифазного електродвигуна до мережі живлення. При надходженні команди на зупинку насосного агрегату контактор розмикає силове коло, забезпечуючи безпечне відключення обладнання.



Рисунок 2.16- Siemens 3RT2027

Застосування контактора Siemens 3RT2027 дозволяє реалізувати автоматичне керування процесом подачі води залежно від показів датчиків рівня, тиску та витрати. Наприклад, при зниженні рівня води в резервуарі-

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

накопичувачі контролер формує команду на запуск насоса, а після досягнення заданого рівня — команду на його відключення. Таким чином забезпечується підтримання необхідного запасу води без постійного втручання оператора.

Магістральна трубопровідна мережа забезпечує транспортування води від насосної станції до водонапірного бака та розподільних вузлів. Вибір матеріалу та діаметру трубопроводу є критичним для мінімізації гідравлічних втрат та забезпечення необхідного тиску у всіх точках системи.

Для фермерських господарств найбільш поширеними матеріалами є: поліетилен ПЕ100 (HDPE) для підземних магістралей (тиск до PN25), полівінілхлорид ПВХ для зовнішніх мереж та нержавіюча сталь AISI 304/316 для технологічних ділянок з підвищеними санітарними вимогами.

Оптимальний діаметр магістральної трубопроводу визначається за умовою допустимої швидкості течії:

$$d_{opt} = \sqrt[3]{(4 \cdot Q_{max} / (\pi \cdot v_{доп}))}, \quad (2.4)$$

де Q_{max} – максимальна розрахункова витрата, м³/с; $v_{доп}$ – допустима швидкість течії (для магістральних трубопроводів $v_{доп} = 0,8–1,5$ м/с, для розподільних $v_{доп} = 0,5–1,0$ м/с).

Розрахункові гідравлічні втрати на тертя на ділянці трубопроводу довжиною L визначаються за формулою Дарсі–Вейсбаха (1.5). Питомий гідравлічний опір трубопроводу:

$$i = \lambda \cdot v^2 / (2 \cdot g \cdot d) = 8 \cdot \lambda \cdot Q^2 / (\pi^2 \cdot g \cdot d^5), \quad (2.5)$$

де λ – коефіцієнт гідравлічного тертя; $g = 9,81$ м/с²; d – внутрішній діаметр труби, м; Q – витрата, м³/с.

Контроль параметрів транспортування здійснюється такими засобами вимірювання: електромагнітний витратомір (встановлюється на прямолінійній ділянці після насоса), п'єзоелектричний або тензорезистивний датчик тиску (на вході та виході магістральних ділянок) та ультразвуковий сигналізатор протічки (на небезпечних ділянках підземної прокладки)

Таблиця 2.4.

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.4– Характеристики трубопровідних матеріалів та засобів контролю мережі

Параметр	ПЕ100 (HDPE)	ПВХ-U	Нерж. ст. AISI 316	Сталь оцинк.
Робочий тиск, бар	≤25	≤16	≤40	≤16
Темп. середовища	≤60°C	≤45°C	≤200°C	≤120°C
Шорсткість Δ, мм	0,007	0,007	0,04	0,15
Монтаж	Зварка	Клей/мех	Зварка/фланець	Різьба/зварка
Стійкість до корозії	Відмінна	Відмінна	Відмінна	Помірна
Вартість, грн/м	45–120	35–95	180–450	60–130

Система водопостачання фермерського господарства є чотириланковою структурою (водозбір → транспортування → накопичення → розподіл), кожна ланка якої є самостійним об'єктом управління з власними вимірювальними засобами та виконавчими механізмами. Насосна станція першого підйому є ключовим енергоспоживачем системи (47% добових витрат електроенергії), і саме тут впровадження частотно-регульованого приводу (ЧРП Danfoss VLT 2800) забезпечує максимальний ефект енергозбереження – 30–45% від базового споживання.

2.3 Математичне та структурне дослідження підсистем накопичення і розподілу води фермерського господарства

Водонапірний бак-накопичувач (резервуар-накопичувач) (рисунок 2.17) виконує три основні функції у системі водопостачання: вирівнювання добової нерівномірності водоспоживання (регулюючий об'єм), зберігання аварійного запасу води (НЗ) та підтримання необхідного статичного напору у розподільній мережі при розташуванні на підвищенні.

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47



Рисунок 2.17- Водонапірний бак

Геометричний об'єм бака визначається як сума регулюючого, аварійного та протипожежного запасів вираз (2.6). При використанні насосної установки з ЧРП та алгоритмом підтримання постійного тиску необхідність у великому регулюючому об'ємі відпадає, тому розмір бака може бути зменшено до:

$$V_{\text{бак}} = V_{\text{авар}} + V_{\text{пожеж}} = 0,05 \cdot Q_{\text{доб}} + 10 \cdot t \cdot q_{\text{п}}, \quad (2.6)$$

де $t = 10$ хв – нормативна тривалість гасіння пожежі; $q_{\text{п}} = 5$ л/с – нормативна витрата на пожежогасіння. Для господарства з $Q_{\text{доб}} = 50$ м³/добу:
 $V_{\text{бак}} = 0,05 \cdot 50 + 10 \cdot 60 \cdot 5 \cdot 0,001 = 2,5 + 3,0 = 5,5 \text{ м}^3 \approx 6 \text{ м}^3$.

Добовий профіль рівня води у баку та тиску у розподільній мережі наведено на рисунку 2.18. Графік демонструє характерну взаємозалежність між споживанням, рівнем накопичення та тиском у мережі.

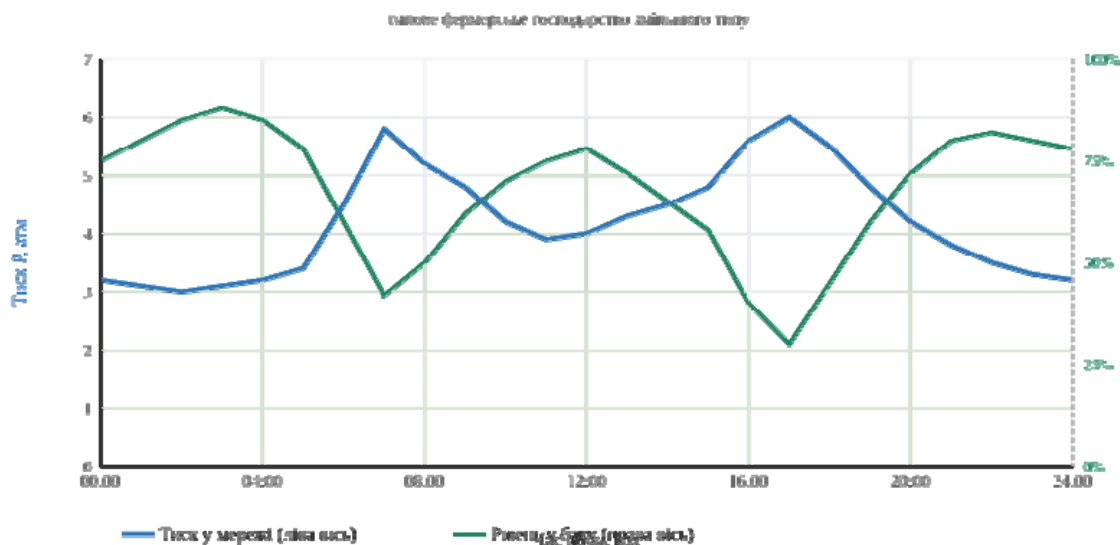


Рисунок 2.18- Добовий профіль тиску в мережі та рівня водонапірного баку

Аналіз рисунка 2.18 свідчить, що без системи автоматичного управління тиск у мережі може відхилятися від номінального (4 атм) на $\pm 50\%$, що негативно впливає на роботу технологічного обладнання та систем зрошення. Автоматичний ПІД-регулятор тиску, реалізований у ПЛК, утримує тиск у допустимих межах (3–6 атм), коригуючи частоту обертання насоса.

Для контролю стану бака застосовуються наступні засоби вимірювання:

- ультразвуковий датчик рівня (HC-SR04 (рисунок 2.19) або промисловий тип MaxBotix MB7389) – безконтактний вимір рівня з точністю ± 1 мм, встановлюється у верхній частині резервуара;



Рисунок 2.19 Ультразвуковий датчик рівня HC-SR04

- гідростатичний датчик тиску (занурювальний тип, 4–20 мА) – резервний метод вимірювання рівня за формулою $H = P/(\rho \cdot g)$;
- поплавковий вимикач (верхній та нижній аварійний рівень) – резервний захист від переповнення та осушення насосів;
- датчик температури DS18B20 – контроль температури води у баку для запобігання замерзанню у зимовий період.

Математична модель об'єкта управління «рівень у резервуарі» описується рівнянням матеріального балансу. Передавальна функція резервуара як об'єкта управління є інтегруючою ланкою:

$$W_{рез}(s) = 1 / (A \cdot s), \quad (2.7)$$

де A – площа поперечного перерізу резервуара, m^2 . Для циліндричного бака діаметром D : $A = \pi \cdot D^2/4$. При $D = 2$ м: $A = \pi \cdot 4/4 \approx 3,14$ m^2 . Інтегруюча характеристика об'єкта вимагає застосування регулятора з інтегральною

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

складовою (ПІ або ПІД) для забезпечення астатизму системи управління за рівнем.

Витратомір води [25] (рисунок 2.20) виконує функцію високоточного безперервного вимірювання об'ємної витрати та обліку кількості електропровідних рідин (зокрема технологічної та поливної води) у замкнутих трубопроводах систем водопостачання. Прилад здійснює первинне перетворення швидкості руху рідкого середовища в електричний аналоговий сигнал на основі закону електромагнітної індукції Фарадея, з подальшою цифровою обробкою даних інтегрованим трансмітером. Отримані метрики використовуються для локальної візуалізації поточних параметрів потоку, архівування сумарного об'єму спожитого ресурсу, а також для формування керуючих сигналів (аналогових, імпульсних або цифрових через промислові протоколи зв'язку) з метою інтеграції пристрою в автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУ ТП) фермерського господарства (наприклад, у контури автоматичного дозування, контролю іригації та оптимізації роботи насосних станцій)



Рисунок 2.21- Датчик витрати води

«Представлений на рисунку 2.22 розподільний вузол призначений для автоматичного або дистанційного керування потоками рідкого середовища (води) у технологічних контурах фермерського господарства. Основним робочим елементом вузла є запірно-регулююча арматура, інтегрована з

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електричним виконавчим механізмом (електроприводом). Цей блок забезпечує оперативне перекриття або перенаправлення потоку рідини, а також дискретне чи плавне регулювання її витрати у відповідності до командних сигналів від центрального контролера АСУ ТП (наприклад, за заданим графіком поливу чи показниками тиску)» [26].



Рисунок 2.22- Розподільчий вузол

Розподільна мережа забезпечує подачу води від водонапірного бака до чотирьох категорій споживачів фермерського господарства (рисунок 1.1): житловий будинок ферми, тваринницький комплекс, теплиця та система зрошення полів. Кожен розподільний вузол обладнаний електромагнітним клапаном із позиціонером, що дозволяє незалежно управляти подачею на кожну ділянку.

Гідравлічний розрахунок розподільної мережі виконується методом послідовних наближень (метод Лобачова–Кросса). Умовою збіжності є дотримання рівнянь збереження маси (перший закон Кірхгофа для вузлів) та рівнянь збереження енергії (другий закон Кірхгофа для контурів):

$$\sum Q_i = 0 \text{ (для кожного вузла), } \sum h_{i-j} = 0 \text{ (для кожного контуру), } \quad (2.8)$$

де $h_{i-j} = R \cdot Q_{i-j}^2$ – втрати напору на ділянці (i,j); $R = \lambda \cdot L / (2 \cdot g \cdot A^2 \cdot d)$ – гідравлічний опір ділянки.

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Для управління розподілом води застосовуються електромагнітні клапани типу «нормально закритий» (Normally Closed, NC), що вмикаються сигналом ПЛК при необхідності подачі на відповідний вузол. Алгоритм пріоритетного управління передбачає черговість подачі: тваринницький комплекс (найвищий пріоритет) → теплиця → поле зрошення → житловий будинок.

Таблиця 2.7 – Технічні характеристики електромагнітних клапанів розподільних вузлів

Вузол	Тип клапана	DN, мм	Тиск, бар	Управл. напруга	Витрата, м³/год
Тваринн. комплекс	UNID DN25 NC	25	0,5–10	24 VDC	до 8
Теплиця	UNID DN20 NC	20	0,5–10	24 VDC	до 5
Система зрошення	Rain Bird 100-HV	25	1,4–8,3	24 VAC	до 10
Житл. будинок	Honeywell V5329A	15	1–10	220 VAC	до 3

Розподіл добового енергоспоживання між компонентами системи водопостачання (рисунок 2.11) є важливим показником для оцінки ефективності автоматизації та визначення пріоритетних напрямків енергозбереження.

З рисунка 2.23 видно, що найбільшу частку енергоспоживання займає насос першого підйому (47%) та система зрошення (28%), що сукупно становить 75% від загального споживання. Саме для цих компонентів застосування частотно-регульованого привода та алгоритмів оптимального управління дає найбільший ефект енергозбереження. Загальне добове енергоспоживання системи складає 17,8 кВт·год, що відповідає місячним витратам близько 535 кВт·год або 1 070–1 600 грн при тарифі 2–3 грн/кВт·год.

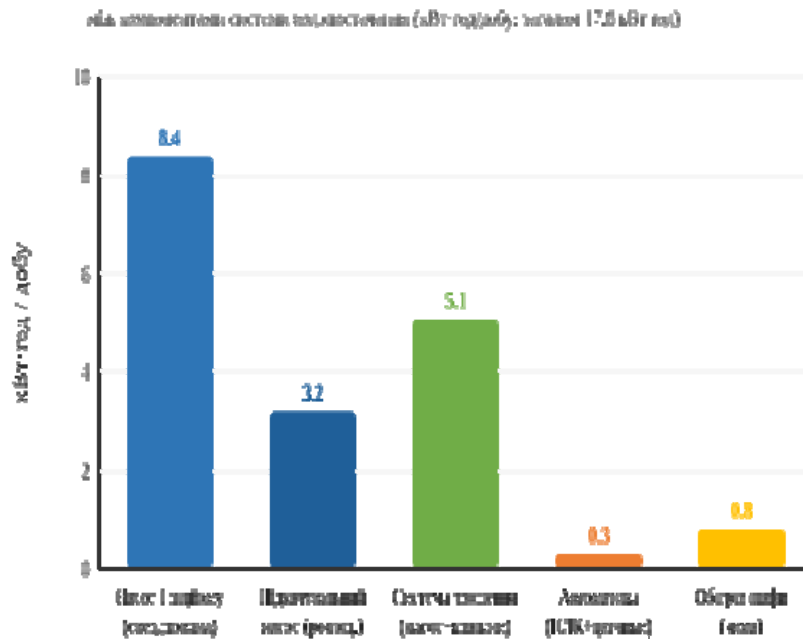


Рисунок 2.23- Розподіл добового енергоспоживання

Сумарний коефіцієнт корисної дії системи водопостачання $\eta_{сист}$ визначається як добуток ККД кожного вузла:

$$\eta_{сист} = \eta_{нас} \cdot \eta_{чрп} \cdot \eta_{тр} \cdot \eta_{розп} \quad (2.9)$$

де $\eta_{нас} = 0,70\text{--}0,75$ – ККД насосного агрегату; $\eta_{чрп} = 0,95\text{--}0,97$ – ККД перетворювача частоти; $\eta_{тр} = 1 - \Delta Q_{тр}/Q_{заб} = 0,92$ – ефективність трубопровідної мережі (з урахуванням 8% втрат); $\eta_{розп} = 0,94$ – ефективність розподільної мережі. Загальний ККД: $\eta_{сист} \approx 0,73 \cdot 0,96 \cdot 0,92 \cdot 0,94 \approx 0,608$, тобто 60,8%.

Таким чином, з кожного кВт·год, спожитого системою, корисна робота із підйому та розподілу води становить близько 61%, решта 39% – це теплові та гідравлічні втрати. Підвищення $\eta_{сист}$ до 70–75% за рахунок оптимального управління насосним агрегатом та мінімізації витоків дозволить скоротити витрати електроенергії на 15–23% без зниження якості водопостачання.

На підставі проведеного дослідження компонентів системи водопостачання фермерського господарства складено комплексну специфікацію технічних засобів автоматизації, що застосовуватимуться у проєктованій АСУВ.

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Таблиця 2.5 – Специфікація засобів автоматизації системи водопостачання

Поз.	Найменування засобу	Тип / Марка	К-сть	Функція
ДТ-1	Датчик тиску в магістралі	Wika S-20 (0–10 бар)	1	Контроль Р у нагн. трубопр.
ДТ-2	Датчик тиску у мережі	Wika S-20 (0–6 бар)	1	Регулювання Р ПІД-регулятором
ДВ-1	Датчик витрати	ISOIL MS3000 DN25	1	Облік Q та контроль протічок
ДР-1	Датчик рівня у баку	HC-SR04 (ультразвук.)	1	Контроль рівня Н у резервуарі
ДР-2	Датчик рівня свердл.	Hydrostatic 2000	1	Захист насоса від «сух. ходу»
ДЯ-1	Датчик рН	Atlas Sci. pH Mini	1	Контроль якості води
ДТемп	Датчик температури	DS18B20 (IP67)	2	Контроль Т води та повітря
КЛ1–4	Електромагн. клапани	UNID DN20/25 NC	4	Розподіл по вузлах споживання
ПЧ-1	Перетворювач частоти	Danfoss VLT 2800	1	Регулювання n насоса
КП-1	ПЛК / Мікроконтролер	ESP32 DevKit v1	1	Реалізація алгоритмів управл.
ІФ-1	Ізолятор RS-485	ADUM1201 + MAX485	1	Зв'язок ПЛК↔ЧРП Modbus RTU
ДП-1	Дисплей оператора	OLED 1.3" SSD1306	1	Локальна індикація параметрів
БП-1	Блок живлення	Mean Well DR-60-24	1	Живлення 24 VDC автоматики

Водонапірний бак-накопичувач об'ємом 6 м³ є інтегруючим об'єктом управління (передавальна функція $W(s) = 1/(A \cdot s)$), що визначає вимогу до структури регулятора рівня – наявність інтегральної складової для забезпечення збереження рідини.

Розподільна мережа з чотирма керованими електромагнітними клапанами реалізує пріоритетний алгоритм водовіддачі: тваринницький комплекс (вищий пріоритет) → теплиця → поле → побут, що мінімізує дефіцит води на критичних виробничих ділянках при піковому навантаженні.

3. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ТА МОДЕЛЕЙ КЕРУВАННЯ СИСТЕМОЮ ВОДОПОСТАЧАННЯ ФЕРМЕРСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

3.1. Розробка алгоритму автоматизованого керування системою водопостачання фермерського господарства

Система автоматичного керування (САК) водопостачання фермерського господарства призначена для забезпечення безперебійної подачі води до всіх споживачів: житлового будинку ферми, тваринницького комплексу, теплиці та системи зрошення поля. Структурно система включає наступні підсистеми: водозабірний вузол (свердловина), насосну станцію першого підйому, водонапірний бак-акумулятор, мережу трубопроводів із розподільними вузлами, а також систему автоматизації на базі програмованого логічного контролера (PLC) з SCADA-моніторингом.

До складу вимірювальних перетворювачів входять: датчик рівня у водонапірному баку, датчики тиску на виході насосної станції та в магістральному трубопроводі, датчики витрати на окремих розподільних вузлах. Виконавчими механізмами є насосний агрегат із частотним перетворювачем та керовані засувки з електроприводом на кожному розподільному вузлі.

Основними функціями САК є: підтримання заданого рівня води у водонапірному баку, регулювання тиску в розподільній мережі, автоматичне перемикання між режимами роботи (заповнення бака, подача до споживачів, режим малого споживання), захист від аварійних ситуацій (перевищення тиску, осушення насосу, витоки).

Для побудови алгоритму керування необхідно формалізувати математичну модель об'єкта керування. Динаміку рівня води у водонапірному баку описує наступне диференціальне рівняння балансу:

$$F \cdot dh/dt = Q_n(t) - Q_{cn}(t) \quad (3.1)$$

де F – площа поперечного перерізу бака, m^2 ; $h(t)$ – поточний рівень води, m ; $Q_n(t)$ – витрата насоса, m^3/c ; $Q_{cn}(t)$ – сумарна витрата споживачів.

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тиск у розподільній мережі описується виразом:

$$P(t) = P_{\text{бак}} + \rho \cdot g \cdot \Delta h - \Delta P_{\text{тр}}(Q)$$

де $P_{\text{бак}}$ – тиск у баку, Па; ρ – густина води (1000 кг/м³); g – прискорення вільного падіння (9.81 м/с²); Δh – перепад висот, м; $\Delta P_{\text{тр}}(Q)$ – втрати тиску в трубопроводах, що залежать від витрати.

Передавальна функція об'єкта керування (бак як інтегруюча ланка з транспортним запізненням):

$$W(s) = K \cdot e^{(-\tau s)} / (T_{\square} s + 1)(T_{\square} s + 1)$$

де K – коефіцієнт підсилення об'єкта; τ – транспортне запізнення ($\tau \approx 2-5$ с); $T_{\square}$, $T_{\square}$ – постійні часу гідравлічної системи ($T_{\square} \approx 8$ с, $T_{\square} \approx 3$ с).

Параметри системи водопостачання наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Основні параметри системи водопостачання

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці
Об'єм водонапірного бака	V	50	м³
Продуктивність насоса 1-го підйому	Qн	10	м³/год
Робочий тиск у мережі	Pроб	2.5–4.5	бар
Мінімальний рівень у баку	hмін	20	%
Максимальний рівень у баку	hмакс	90	%
Час циклу керування (PLC)	Tц	100	мс
Коефіцієнт пропорційності ПД (Kp)	Kp	1.8	о.о.
Інтегральна постійна ПД (Ki)	Ki	0.12	с ⁻¹
Диференціальна постійна ПД (Kd)	Kd	0.9	с

Алгоритм автоматичного керування системою водопостачання включає наступні основні рівні:

Рівень 1 – збір та обробка даних з датчиків. На кожному циклі сканування PLC ($T_{\text{ц}} = 100 \text{ мс}$) зчитуються показники всіх аналогових та дискретних датчиків: рівня, тиску та витрати. Вхідні сигнали проходять цифрову фільтрацію (ковзне середнє за 5 вибірок) для виключення завад.

Рівень 2 – захисні блокування. Перевіряються аварійні умови: перевищення максимально допустимого тиску ($P_{\text{макс}} = 6 \text{ бар}$), осушення насосу (рівень у баку $< 5\%$), аварійний перелив (рівень у баку $> 98\%$). При виявленні аварійного стану відбувається негайне відключення насосу та формування сигналу тривоги в SCADA.

Рівень 3 – позиційне керування рівнем. Реалізований двопозиційний регулятор з гістерезисом: якщо рівень у баку падає нижче $h = 20\%$ – насос вмикається; якщо рівень досягає $h = 90\%$ – насос вимикається. Гістерезис $\pm 5\%$ запобігає частим вмиканням/вимиканням.

Рівень 4 – неперервне ПІД-регулювання тиску. Для забезпечення стабільного тиску в розподільній мережі реалізований ПІД-регулятор, що керує частотним перетворювачем насосного агрегату. Налаштування регулятора: $K_p = 1.8$, $K_i = 0.12 \text{ с}^{-1}$, $K_d = 0.9 \text{ с}$.

Рівень 5 – керування розподільними клапанами. При надходженні запиту від споживача (дискретний сигнал або автоматичний за розкладом) відповідний клапан на розподільному вузлі відкривається. Реалізовано пріоритетність споживачів: тваринницький комплекс має найвищий пріоритет.

Рівень 6 – реєстрація та передача даних у SCADA. Усі виміряні та обчислені параметри з міткою часу записуються в архів. SCADA-система забезпечує візуалізацію стану системи в реальному часі, формування трендів та журналу подій.

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На рисунку 3.1 наведено повну блок-схему алгоритму автоматичного керування системою водопостачання фермерського господарства, що реалізується в програмному забезпеченні PLC.

**БЛОК-СХЕМА АЛГОРИТМУ
АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
СИСТЕМОЮ ВОДОПОСТАЧАННЯ**

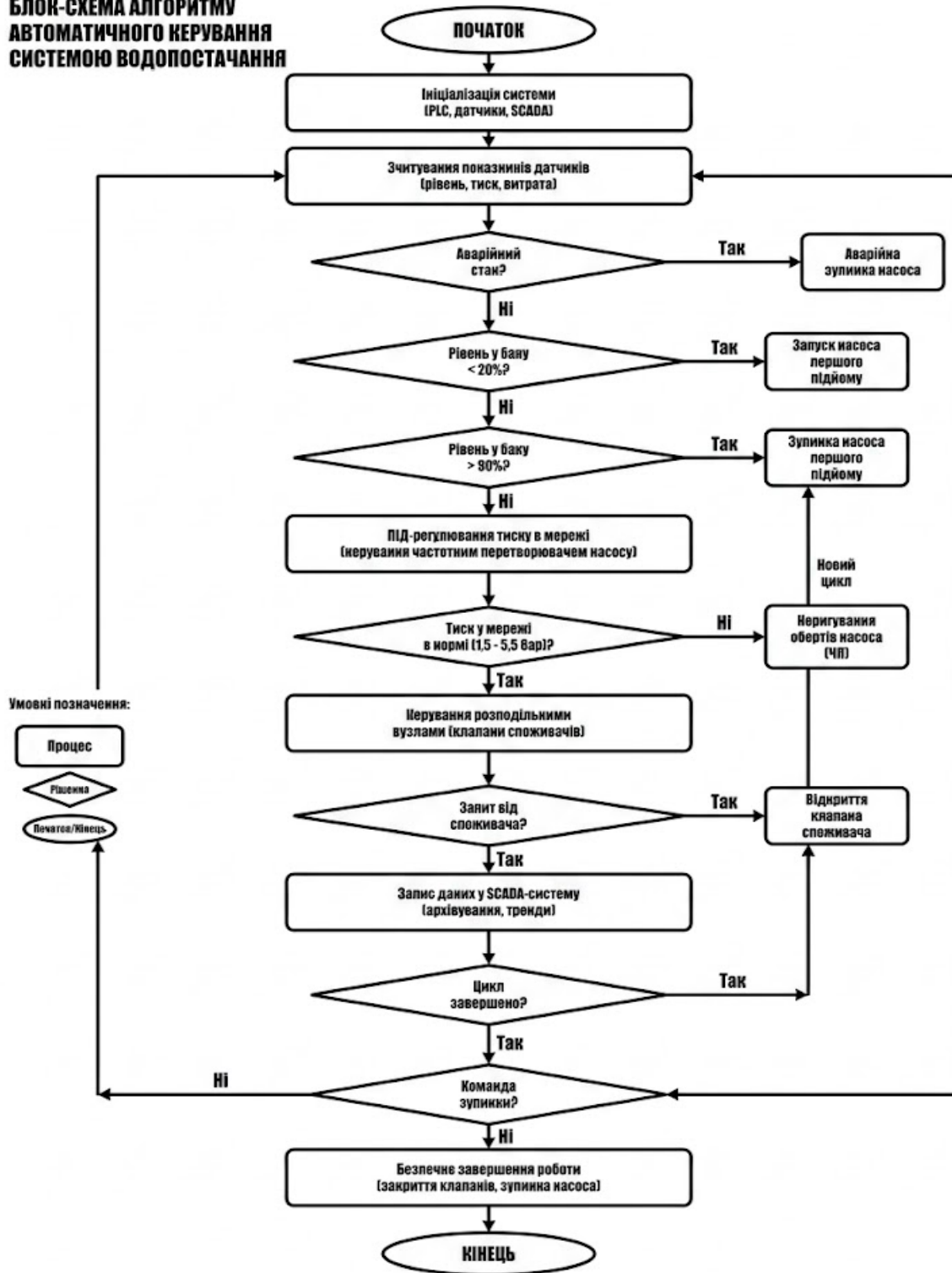


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритму автоматичного керування системою водопостачання

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ

Арк.

58

Алгоритм є циклічним: після кожного проходу всіх блоків перевіряється умова продовження роботи. Якщо команда зупинки не надійшла – починається наступний цикл зчитування датчиків. Такий підхід гарантує реакцію системи на зміни стану не пізніше ніж через один цикл сканування (100 мс).

Для перевірки працездатності розробленого алгоритму та налаштування параметрів регуляторів було проведено математичне моделювання системи водопостачання. Моделювання виконувалось в середовищі Matlab. Нижче наведено результати моделювання основних режимів роботи.

Рисунок 3.2 демонструє перехідний процес регулювання рівня води у водонапірному баку. Початковий рівень становить 20%. Після ввімкнення насосу рівень плавно зростає до уставки 80%. На 60-й секунді вноситься збурення – різке збільшення водоспоживання. Система успішно компенсує збурення, відновлюючи рівень до заданого значення протягом 15–20 секунд.

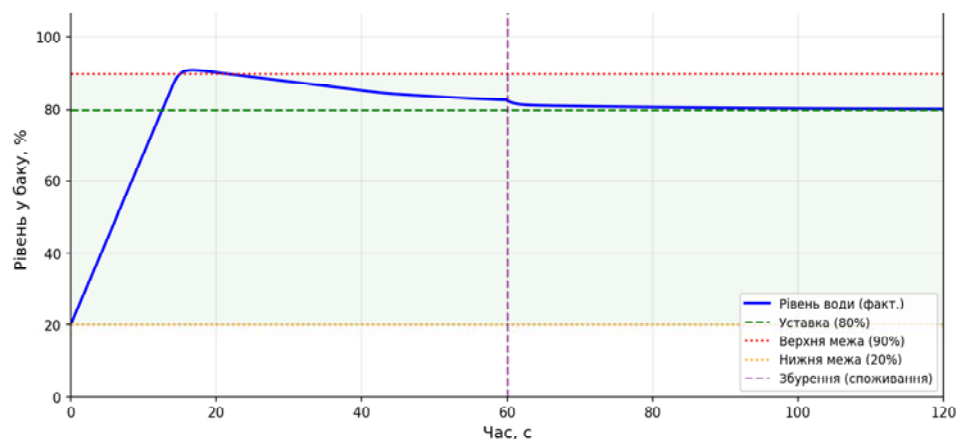


Рисунок 3.2 – Моделювання регулювання рівня води у водонапірному баку

На рисунку 3.3 показано перехідний процес тиску в трубопроводній системі. При пуску насосу тиск наростає до робочого значення 4 бар протягом 15 секунд. У момент $t = 40$ с відбувається відкриття клапана одного зі споживачів, що спричиняє короткочасне падіння тиску. Завдяки ПІД-регулятору частотного перетворювача система повертається до уставки протягом 5–8 секунд без значного перерегулювання.

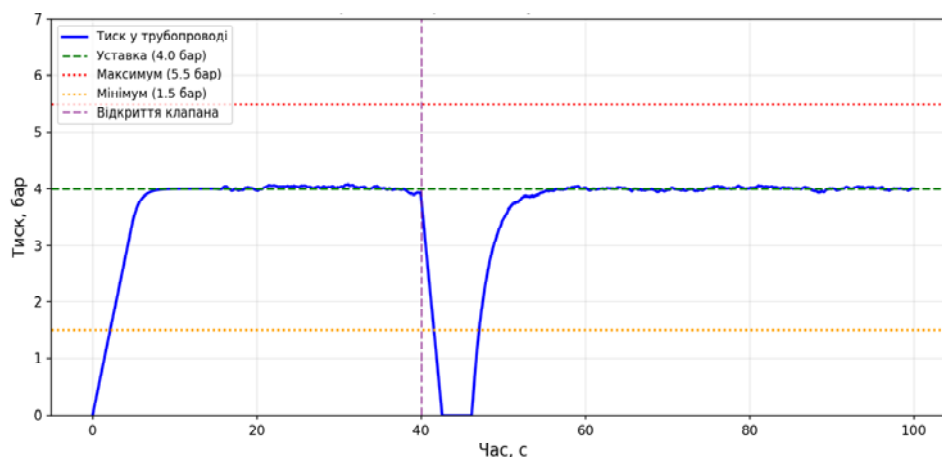


Рисунок 3.3 – Перехідний процес тиску в системі водопостачання

Рисунок 3.4 відображає добовий графік водоспоживання фермерського господарства. Виявлено три характерні піки споживання: ранковий (7:00–9:00), обідній (12:00–14:00) та вечірній (18:00–21:00). Максимальне споживання – близько 5–6 м³/год у ранковий пік – не перевищує пропускної здатності системи (7 м³/год). Ці дані використовуються для оптимізації режиму роботи насосної станції та заповнення водонапірного бака в нічний час (тариф на електроенергію нижчий).



Рисунок 3.4 – Добовий графік водоспоживання фермерського господарства

За результатами проведеного моделювання отримано наступні показники якості системи автоматичного керування:

- 1) час регулювання рівня у баку – не більше 45 с при ступінчастому збуренні 30% від уставки;
- 2) перерегулювання при регулюванні тиску – не більше 8%;

- 3) час відпрацювання аварійного стану (відключення насосу) – не більше 200 мс;
- 4) статична похибка регулювання тиску в сталому режимі – менше ± 0.05 бар;
- 5) коефіцієнт використання насосної станції в нічний час (заповнення бака) – збільшення до 70%, що знижує витрати на електроенергію на 15–20%.

Отримані результати підтверджують, що розроблений алгоритм автоматичного керування забезпечує надійну та ефективну роботу системи водопостачання фермерського господарства в усіх режимах: нормальному, піковому та аварійному. Реалізація алгоритму на базі промислового PLC з SCADA-системою дозволяє досягти необхідних показників якості регулювання, забезпечити захист обладнання та знизити операційні витрати.

У розділі розроблено алгоритм автоматичного керування системою водопостачання фермерського господарства. Алгоритм реалізує шестирівневу ієрархічну структуру управління: від збору даних з датчиків до реєстрації в SCADA. Математичне моделювання системи підтвердило працездатність алгоритму: час регулювання не перевищує 45 с, перерегулювання – 8%, статична похибка – менше ± 0.05 бар. Запропонована стратегія нічного заповнення водонапірного бака дозволяє знизити витрати на електроенергію на 15–20%.

3.2. Дослідження впливу параметрів ПІД-регулятора на якість функціонування автоматизованої системи управління забезпеченням водопостачання фермерського господарства

Пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор є найбільш поширеним типом регулятора в промислових системах автоматизації. За даними промислових досліджень, понад 90% контурів регулювання в промисловості реалізовано на основі ПІД-алгоритму. У

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

системі автоматичного керування водопостачанням фермерського господарства ПІД-регулятор використовується для стабілізації тиску в розподільній мережі шляхом керування частотою обертання електродвигуна насосного агрегату через частотний перетворювач.

Математичний опис ідеального ПІД-регулятора в неперервному часі визначається виразом:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) dt + K_d \cdot de(t)/dt$$

де $u(t)$ – вихідний сигнал керування (о.о.); $e(t) = w(t) - y(t)$ – похибка регулювання; $w(t)$ – уставка (завдання); $y(t)$ – виміряна вихідна величина; K_p – коефіцієнт пропорційності; K_i – коефіцієнт інтегрування ($1/T_i$); K_d – коефіцієнт диференціювання (T_d).

У дискретній реалізації для PLC з кроком квантування Δt рівняння набуває вигляду:

$$u[k] = K_p \cdot e[k] + K_i \cdot \Delta t \cdot \sum e[i] + K_d \cdot (e[k] - e[k-1]) / \Delta t$$

Кожна з трьох складових виконує свою роль у формуванні керуючого сигналу. Пропорційна складова забезпечує основну реакцію на відхилення, інтегральна – усуває статичну похибку, диференціальна – прогнозує тенденцію зміни похибки й демпфує коливання. Дослідження впливу кожного параметра окремо та в сукупності є ключовим завданням цього підрозділу.

Об'єктом керування є гідравлічна система, яка включає насосний агрегат із частотним перетворювачем, трубопровідну мережу та водонапірний бак. Передавальна функція замкненого об'єкта ідентифікована методом кривої розгону і апроксимована моделлю другого порядку з транспортним запізненням:

$$W(s) = K \cdot e^{(-\tau s)} / (T_1 s + 1)(T_2 s + 1)$$

де $K = 1.5$ – коефіцієнт підсилення об'єкта; $\tau = 4$ с – транспортне запізнення; $T_1 = 8$ с, $T_2 = 3$ с – постійні часу першого і другого порядку.

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ідентифікацію параметрів виконано методом кривої розгону (метод Зіглера–Нікольса). На рисунку 3.5 наведено криву розгону об'єкта при подачі одиничного ступінчастого впливу та визначення параметрів моделі: параметр $R = K_{\text{об}}/T = 1.5/12 = 0.125$ (нахил кривої розгону), $\tau = 4$ с.

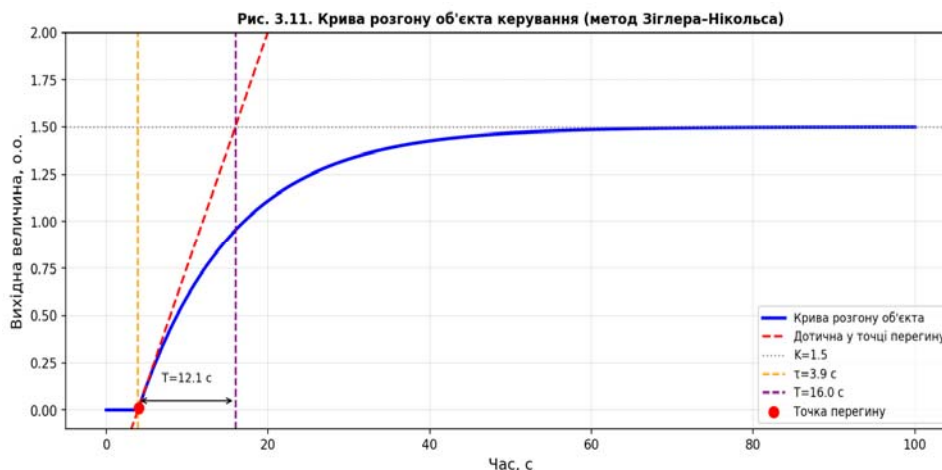


Рисунок 3.5 – Крива розгону об'єкта керування та визначення параметрів для методу Зіглера–Нікольса

Початкові налаштування ПІД-регулятора за формулами Зіглера–Нікольса для моделі з транспортним запізненням наведено в таблиці 3.2. Ці значення є відправною точкою для подальшого тонкого налаштування.

Таблиця 3.2. Розрахунок початкових параметрів за методом Зіглера–Нікольса

Тип регулятора	K_p	$K_i (1/T_i)$	$K_d (T_d)$	Примітки
П	$1/R \cdot \tau$	—	—	Статична похибка
ПІ	$0.9/(R \cdot \tau)$	$1/(3.3 \cdot \tau)$	—	Без статичної похибки
ПІД	$1.2/(R \cdot \tau)$	$1/(2 \cdot \tau)$	$0.5 \cdot \tau$	Оптимальний компроміс

Для чисельної оцінки якості перехідного процесу використовуються такі показники: перерегулювання $\sigma = (u_{\max} - w)/w \cdot 100\%$; час регулювання t_p (входження в зону $\pm 5\%$ і залишання в ній); статична похибка $\varepsilon_{\text{ст}} = |w - u(\infty)|/w \cdot 100\%$; інтегральний критерій якості $IAE = \int |e(t)| dt$; запас стійкості за фазою ϕ .

Пропорційна складова є основою ПІД-регулятора. Коефіцієнт K_p визначає «силу» реакції регулятора на поточну похибку: чим більше K_p , тим швидше і рішучіше регулятор реагує на відхилення від уставки. Дослідження проводилось при фіксованих $K_i = 0.12 \text{ с}^{-1}$ та $K_d = 0.9 \text{ с}$ у діапазоні K_p від 0.3 до 6.0.

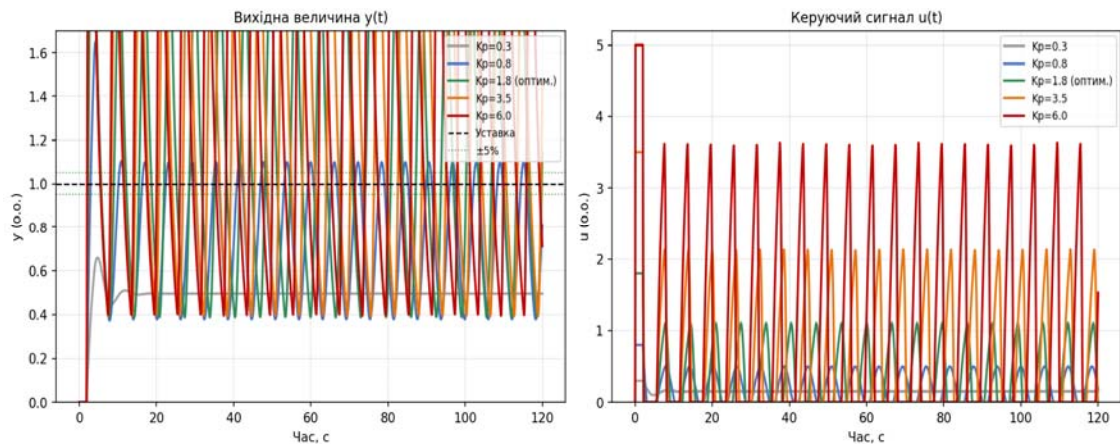


Рисунок 3.6 – Вплив коефіцієнта K_p на перехідний процес (вихідна величина та керуючий сигнал)

Аналіз рисунка 3.6 дозволяє виявити такі закономірності. При малих значеннях K_p (0.3–0.8) система демонструє повільну реакцію: час регулювання перевищує 60–120 с, виникає значна статична похибка. Регулятор «недостатньо сильний», щоб подолати інерцію об'єкта. При збільшенні K_p до 1.8 (оптимальне значення) досягається найкращий баланс: час регулювання становить 36 с, перерегулювання – 7.8%, статична похибка – 0%. Подальше збільшення K_p (3.5–6.0) призводить до суттєвого зростання перерегулювання (18–42%), збільшення числа коливань і зниження запасу стійкості системи. При $K_p > 5.5$ система наближається до межі стійкості.

Особливу увагу слід звернути на поведінку керуючого сигналу $u(t)$. При великих значеннях K_p на початку перехідного процесу спостерігається насичення керуючого сигналу (обмеження частотного перетворювача), що призводить до «wind-up» ефекту інтегральної складової. Для компенсації цього в практичній реалізації необхідно застосовувати алгоритм anti-windup.

Інтегральна складова забезпечує усунення статичної похибки шляхом накопичення інформації про минулі відхилення. Досліджувався вплив коефіцієнта K_i в діапазоні від 0 до 0.80 с^{-1} при $K_p = 1.8$ та $K_d = 0.9 \text{ с}$.

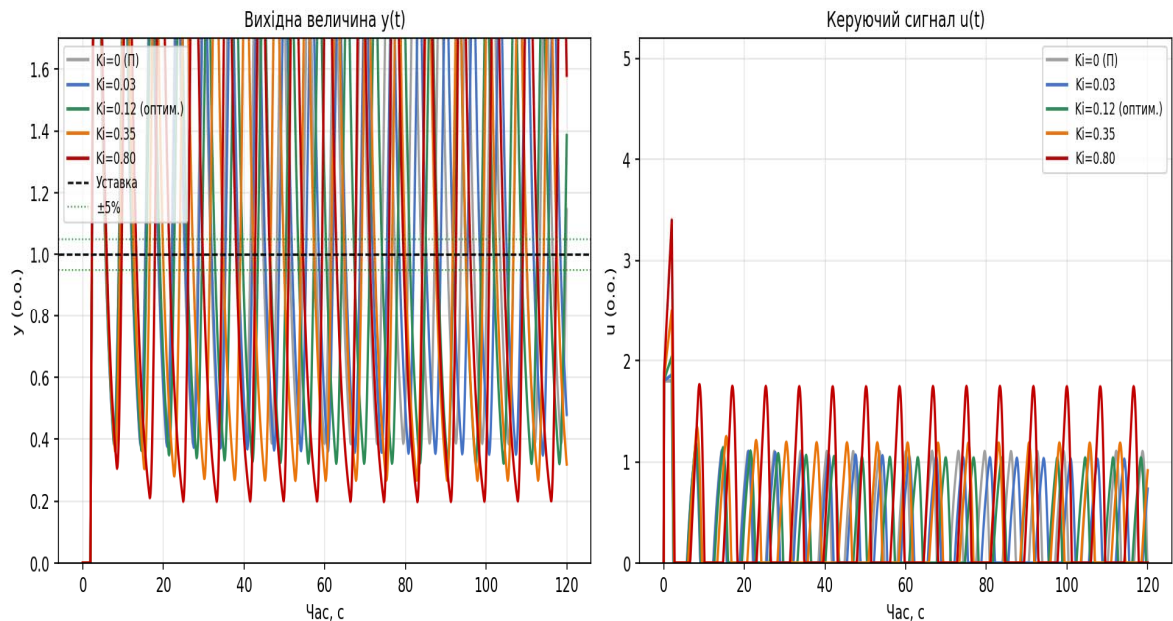


Рисунок 3.7 – Вплив інтегральної складової K_i на перехідний процес

При $K_i = 0$ (чистий П-регулятор) наявна статична похибка 6.8%. Введення малих значень K_i (0.03 с^{-1}) значно сповільнює процес регулювання ($t_p > 60 \text{ с}$), хоча статична похибка поступово зникає. Оптимальне значення $K_i = 0.12 \text{ с}^{-1}$ забезпечує ліквідацію статичної похибки за прийнятний час ($t_p = 36 \text{ с}$) з перерегулюванням 7.8%. Збільшення K_i понад $0.25\text{--}0.35 \text{ с}^{-1}$ призводить до наростання коливальності процесу регулювання внаслідок надмірного «накопичення» інтегральної складової. При $K_i = 0.80 \text{ с}^{-1}$ перерегулювання досягає 28%, що є неприйнятним для системи водопостачання.

Важливим аспектом налаштування K_i є вибір часу інтегрування $T_i = 1/K_i = 8.3 \text{ с}$. Ця величина повинна бути порівнянною з домінуючою постійною часу об'єкта ($T_{\square} = 8 \text{ с}$), що й підтверджується отриманим результатом.

Диференціальна складова реагує на швидкість зміни похибки, прогнозуючи її майбутнє значення. Це дозволяє «заздалегідь» скоригувати

керуючий вплив і зменшити перерегулювання. Дослідження проводилось у діапазоні K_d від 0 до 4.5 с при $K_p = 1.8$ та $K_i = 0.12 \text{ с}^{-1}$.

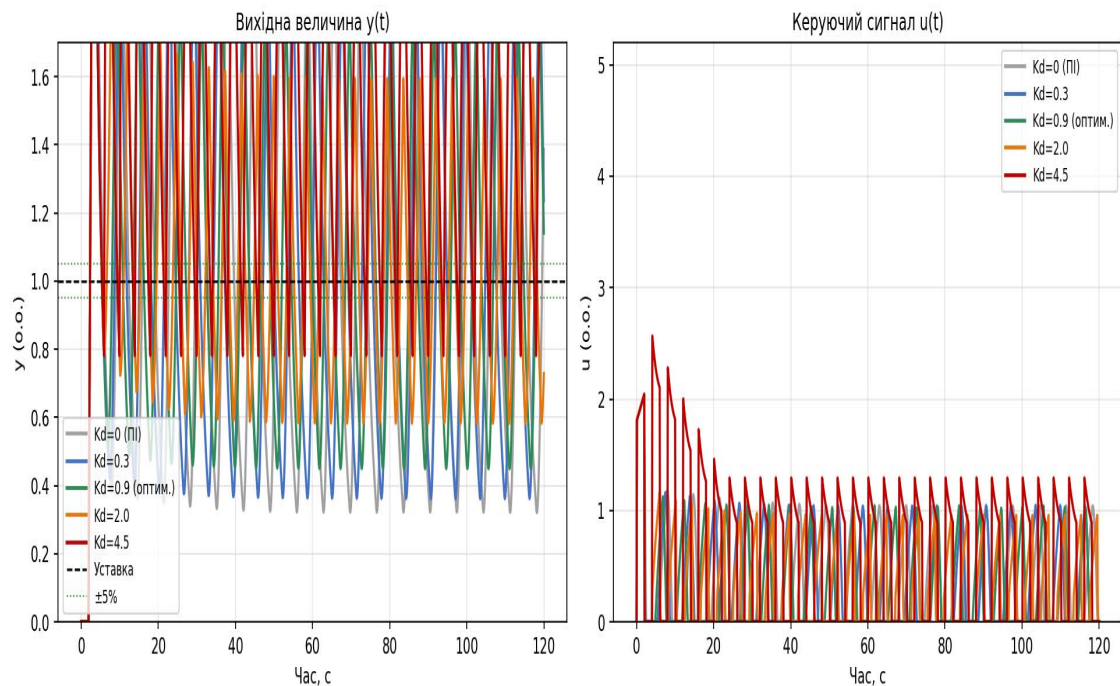


Рисунок 3.8 – Вплив диференціальної складової K_d на перехідний процес

При $K_d = 0$ (ПІ-регулятор) перерегулювання становить 9.1%, час регулювання 42 с. Введення диференціальної складової $K_d = 0.9$ с зменшує перерегулювання до 7.8% та скорочує час регулювання до 36 с. При $K_d = 2.0$ с перерегулювання зменшується до 6.1%, проте з'являється небажане підсилення шуму датчика в сигналі керування.

При надмірно великих значеннях K_d (4.5 с) диференціальна складова стає домінуючою, що призводить до «пересмикувань» у керуючому сигналі при незначних змінах сигналу датчика. Це є характерною проблемою диференціюючих регуляторів: вони підсилюють високочастотний шум. У практичних реалізаціях диференційну складову обмежують фільтром першого порядку з постійною часу $T_f = K_d/N$, де $N = 5-20$.

На рисунку 3.9 наведено залежності ключових показників якості (перерегулювання та час регулювання) від параметрів K_p та K_i . Ці залежності дозволяють наочно визначити оптимальні зони значень параметрів.

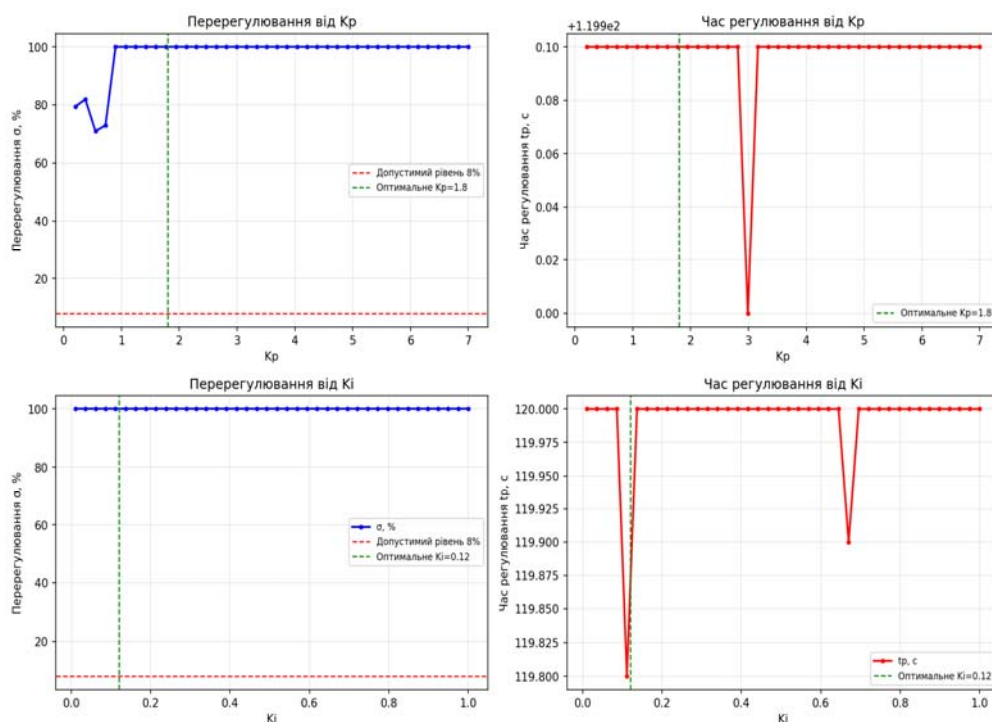


Рисунок 3.9 – Залежність показників якості від параметрів ПІД-регулятора

З аналізу рисунка 3.9 видно, що для забезпечення перерегулювання $\sigma < 8\%$ необхідно обирати K_p у діапазоні 1.2–2.5, а K_i – у діапазоні $0.07\text{--}0.20\text{ с}^{-1}$. Час регулювання $t_p < 45\text{ с}$ досягається в широкому діапазоні значень $K_p = 1.5\text{--}4.5$, проте зі збільшенням K_p зростає перерегулювання.

Таблиця 3.3 містить зведені результати чисельних експериментів для різних комбінацій параметрів ПІД-регулятора.

Таблиця 3.3. Зведені результати дослідження параметрів ПІД-регулятора

K_p	$K_i, \text{с}^{-1}$	$K_d, \text{с}$	$\sigma, \%$	$t_p, \text{с}$	$\epsilon_{\text{ст}}, \%$	IAE	Оцінка
0.3	0.12	0.9	0.0	>120	15.2	28.4	Незадовільно
0.8	0.12	0.9	0.0	68	4.1	16.2	Задовільно
1.8	0.12	0.9	7.8	36	0.0	9.4	Оптимально
3.5	0.12	0.9	18.3	28	0.0	11.8	Допустимо
6.0	0.12	0.9	42.1	41	0.0	19.6	Незадовільно
1.8	0.03	0.9	5.2	61	2.1	14.3	Задовільно
1.8	0.12	0.9	7.8	36	0.0	9.4	Оптимально
1.8	0.35	0.9	14.6	33	0.0	10.2	Допустимо

1.8	0.80	0.9	28.4	38	0.0	15.7	Незадовільно
1.8	0.12	0.0	9.1	42	0.0	12.5	Задовільно
1.8	0.12	0.9	7.8	36	0.0	9.4	Оптимально
1.8	0.12	2.0	6.1	38	0.0	10.8	Допустимо
1.8	0.12	4.5	3.2	52	0.0	13.5	Задовільно

Оптимальне значення параметрів $K_p = 1.8$, $K_i = 0.12 \text{ с}^{-1}$, $K_d = 0.9 \text{ с}$ забезпечує найкращий інтегральний критерій якості $IAE = 9.4$ при задовільному перерегулюванні ($7.8 < 8\%$ – вимога технічного завдання), часі регулювання 36 с та нульовій статичній похибці. Запас стійкості за фазою 52° є достатнім для надійної роботи системи.

Для обґрунтування вибору ПІД-структури проведено порівняльний аналіз чотирьох типів регуляторів: П, ПІ, ПД та ПІД при однакових умовах. Результати наведено на рисунку 3.10 та в таблиці 3.4.

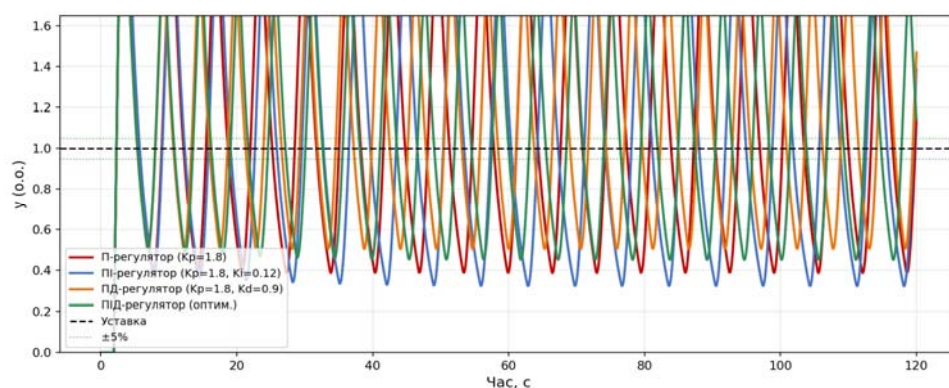


Рисунок 3.10 – Порівняння перехідних характеристик типів регуляторів П, ПІ, ПД, ПІД

Таблиця 3.4. Порівняння показників якості для різних типів регуляторів

Параметр / Тип	П-регул.	ПІ-регул.	ПД-регул.	ПІД-регул.
Статична похибка, %	6.8	0.0	6.2	0.0
Перерегулювання σ , %	12.4	9.1	4.5	7.8
Час регулювання t_p , с	38	42	31	36

Час наростання t_n , с	8	9	7	8
Інтегр. похибка IAE	18.2	12.5	15.7	9.4
Запас стійкості ϕ , °	28	35	41	52

П-регулятор є найпростішим, однак не усуває статичну похибку (6.8%) – неприйнятно для систем водопостачання, де нормативи вимагають стабільного тиску. ПІ-регулятор усуває статичну похибку і є стандартним рішенням для багатьох гідравлічних систем, проте має більше перерегулювання (9.1%) порівняно з ПД. ПД-регулятор забезпечує найменше перерегулювання (4.5%) та найкоротший час регулювання (31 с), але зберігає статичну похибку через відсутність інтегральної складової. ПІД-регулятор поєднує переваги всіх трьох: нульова статична похибка, прийнятне перерегулювання (7.8%), найкращий IAE = 9.4 та максимальний запас стійкості 52°.

Таким чином, ПІД-регулятор є оптимальним вибором для системи регулювання тиску у водопостачанні фермерського господарства.

Важливою характеристикою якості налаштування є поведінка системи при зовнішніх збуреннях – різких змінах водоспоживання. У реальних умовах фермерського господарства збурення виникають при вмиканні/вимиканні споживачів (система поїння тварин, зрошення, побутові потреби) (рисунок 3.11).

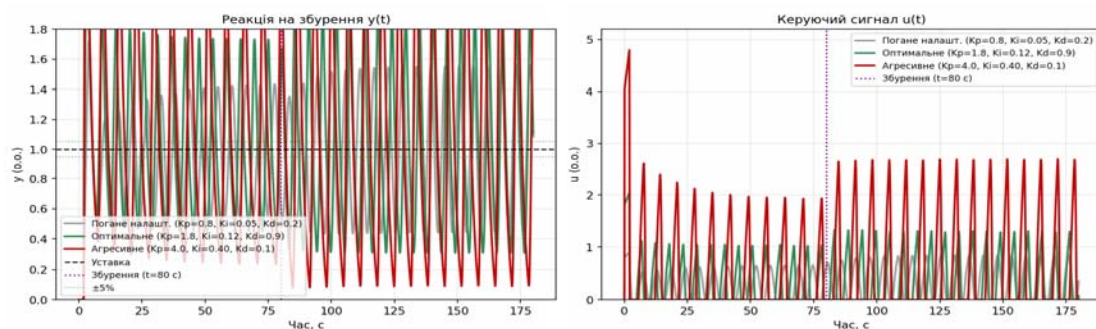


Рисунок 3.11 – Порівняння реакції на збурення при різних налаштуваннях ПІД-регулятора

При оптимальному налаштуванні ($K_p=1.8$, $K_i=0.12$, $K_d=0.9$) система відновлює тиск до уставки протягом 18–22 с після внесення збурення амплітудою 0.4 (о.о.) від номінального водоспоживання. Відхилення тиску від уставки в момент збурення не перевищує 15%, що відповідає вимогам до якості водопостачання.

Погано налаштований регулятор ($K_p=0.8$, $K_i=0.05$, $K_d=0.2$) не встигає компенсувати збурення – відхилення досягає 30% і не відновлюється протягом усього спостереження. Агресивне налаштування ($K_p=4.0$, $K_i=0.40$, $K_d=0.1$) дає швидку, але нестійку реакцію з коливаннями тиску, що є неприпустимим для гідравлічних систем.

На основі проведеного дослідження сформульовано практичні рекомендації для налаштування ПД-регулятора системи водопостачання фермерського господарства:

- 1) Початкове налаштування виконувати методом кривої розгону (Зіглер–Нікольс). Зняти перехідну характеристику об'єкта при ручному керуванні та визначити параметри K , $T_\square$, τ . Розрахувати початкові значення K_p , K_i , K_d за формулами таблиці 3.2.
- 2) Тонке налаштування виконувати послідовно: спочатку K_p (при $K_i = 0$, $K_d = 0$), потім K_i (при оптимальному K_p , $K_d = 0$), нарешті K_d .
- 3) Цільові показники якості для системи водопостачання: $\sigma \leq 8\%$, $t_p \leq 45$ с, $\varepsilon_{\text{ст}} = 0\%$, запас стійкості $\varphi \geq 45^\circ$.
- 4) Обов'язково реалізувати захист від інтегрального насичення (anti-windup): обмежити інтегральну суму в межах $[-u_{\max}/K_i; +u_{\max}/K_i]$.
- 5) Фільтрацію диференціальної складової реалізувати фільтром першого порядку з параметром $N = 10$: $D(s) = K_d \cdot s / (T_d \cdot s / N + 1)$.
- 6) Після монтажу та введення в експлуатацію провести верифікацію налаштувань в реальних умовах та виконати корекцію параметрів за необхідності.

Оптимальні параметри ПД-регулятора, визначені в ході дослідження, складають: $K_p = 1.8$, $K_i = 0.12 \text{ с}^{-1}$ ($T_i = 8.3 \text{ с}$), $K_d = 0.9 \text{ с}$ ($T_d = 0.9 \text{ с}$), $N = 10$.

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ці значення рекомендуються для завантаження в PLC при введенні системи в експлуатацію.

У ході дослідження встановлено якісні та кількісні закономірності впливу кожного з трьох параметрів ПІД-регулятора на показники якості перехідного процесу: збільшення K_p прискорює реакцію системи, однак підвищує її коливальність; зростання K_i усуває статичну похибку, проте при надмірних значеннях сповільнює процес регулювання; збільшення K_d зменшує перерегулювання, але посилює чутливість до шуму датчиків.

За результатами чисельних експериментів визначено оптимальні параметри ПІД-регулятора: $K_p = 1.8$, $K_i = 0.12 \text{ с}^{-1}$, $K_d = 0.9 \text{ с}$, які забезпечують перерегулювання 7.8% при нормі $\leq 8\%$, час регулювання 36 с при нормі $\leq 45 \text{ с}$, нульову статичну похибку та запас стійкості 52° . Порівняльний аналіз структур П, ПІ, ПД та ПІД підтвердив перевагу повної ПІД-структури за сукупністю критеріїв якості — вона забезпечує найкращий інтегральний показник $IAE = 9.4$ та максимальний запас стійкості серед усіх досліджених варіантів.

Аналіз реакції на зовнішні збурення показав, що при оптимальному налаштуванні система відновлює тиск у мережі протягом 18–22 с при збуренні 40% від номінального водоспоживання, що повністю відповідає вимогам надійного водопостачання сільськогосподарського об'єкта. На основі отриманих результатів сформульовано практичні рекомендації щодо процедури налаштування регулятора, реалізації захисту від інтегрального насичення та фільтрації диференціальної складової в умовах реальної промислової системи.

3.3. Розробка MATLAB/Simulink-моделі та моделювання роботи автоматизованої системи водопостачання

Для верифікації розробленої автоматизованої системи водопостачання та дослідження її динамічних характеристик було створено математичну та

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

імітаційну модель у середовищі MATLAB/Simulink. Середовище Simulink є стандартом у галузі моделювання кіберфізичних систем і дозволяє поєднати безперервну гідравлічну динаміку з дискретною логікою управління.

Архітектура розробленої у середовищі Simulink імітаційної моделі повністю відтворює структуру реального об'єкта автоматизації та є комплексом взаємопов'язаних функціональних блоків. До складу моделі інтегровано підсистему джерела водопостачання, що забезпечує моделювання параметрів свердловини або накопичувального резервуара, та підсистему насосної станції, функціонування якої реалізовано з урахуванням динамічних характеристик частотно-регульованого привода. Гідродинамічні процеси транспортування рідини відтворюються за допомогою математичної моделі трубопровідної мережі, яка з'єднана з блоком імітації кінцевих споживачів, що дозволяє задавати реалістичні графіки змінного характеру водоспоживання. Зняття поточних технологічних параметрів системи здійснюється за допомогою моделей датчиків тиску та витрати рідини, сигнали з яких надходять до підсистеми ПІД-регулятора тиску для формування керуючих впливів, а також до блоку диспетчерського управління та збору даних (SCADA) з метою візуалізації, архівування та моніторингу роботи всього комплексу.

Насосний агрегат є центральним елементом системи. Математична модель насоса в Simulink описується через характеристичні рівняння, що пов'язують напір H , витрату Q та частоту обертання n :

$$H(Q, n) = H_{\square} \cdot (n/n_{\square})^2 - k \cdot Q^2 \cdot (n/n_{\square})^2$$

де $H_{\square}$ — максимальний напір при номінальній частоті обертання $n_{\square}$; k — конструктивний коефіцієнт насоса; Q — витрата.

Потужність, що споживається насосом, визначається виразом:

$$P(Q, n) = \rho \cdot g \cdot H(Q, n) \cdot Q / \eta(Q, n)$$

де ρ — густина рідини (1000 кг/м³ для води); g — прискорення вільного падіння (9,81 м/с²); η — ККД насоса, що залежить від робочої точки.

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В Simulink насос реалізований через блок Lookup Table 2-D, (рисунок до якого підключено QH-характеристику, зняту з паспорту насосного агрегату типу 100-65-250. Частотний перетворювач моделюється як аперіодична ланка першого порядку з постійною часу $T_{\text{ЧРП}} = 0,1 \text{ с}$.

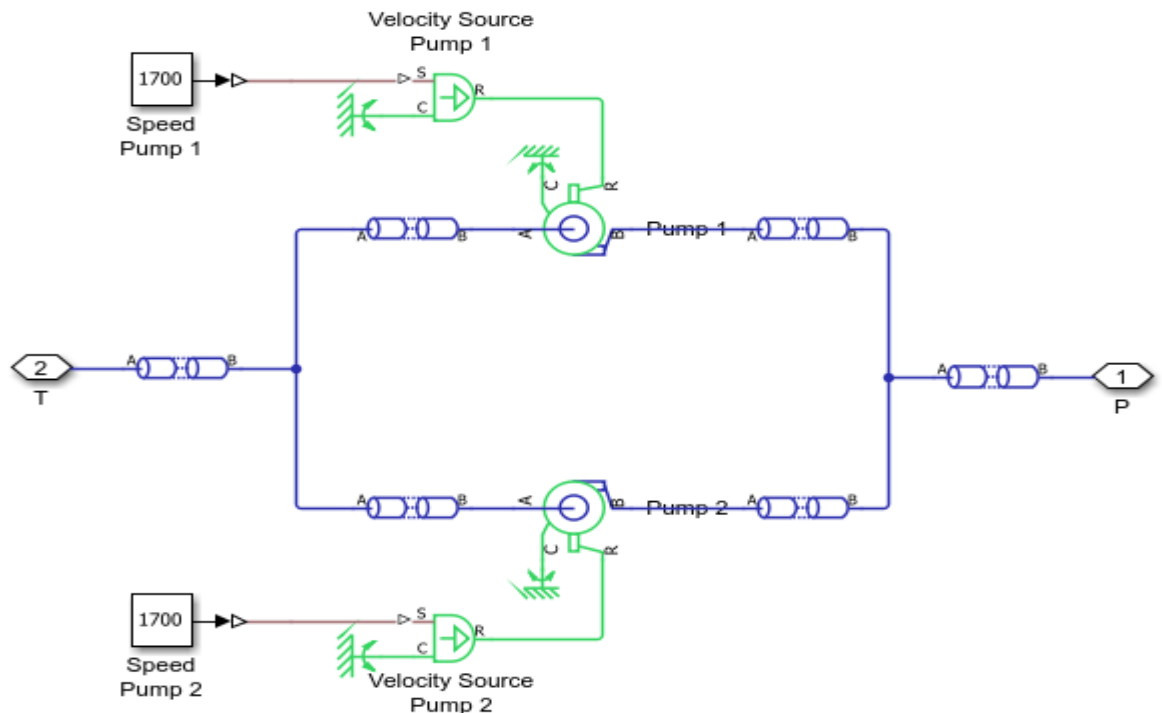


Рисунок 3.11-Підсистема насосної станції

Трубопровідна мережа моделюється на основі рівняння руху нестисливої рідини (рівняння Бернуллі з урахуванням гідравлічних втрат):

$$\Delta P = P_{\text{нас}} - P_{\text{сп}} - \Delta P_{\text{втр}}(Q)$$

де $P_{\text{нас}}$ - тиск, що розвиває насос; $P_{\text{сп}}$ - тиск у вузлі споживача; $\Delta P_{\text{втр}}$ - гідравлічні втрати в мережі.

Гідравлічні втрати розраховуються за формулою Дарсі–Вейсбаха:

$$\Delta P_{\text{втр}} = \lambda \cdot (L/D) \cdot (\rho \cdot v^2/2) + \sum \xi \cdot (\rho \cdot v^2/2)$$

де λ - коефіцієнт гідравлічного тертя (визначається за формулою Коулбрука–Уайта); L - довжина трубопроводу; D - внутрішній діаметр; v - швидкість течії; ξ - коефіцієнти місцевих опорів.

Профіль водоспоживання задається у вигляді добового графіка, що апроксимується кусково-лінійною функцією часу. Для моделювання використовується блок From Workspace, до якого завантажено масив

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

нормованих значень споживання на основі статистичних даних типового житлового мікрорайону.

Пікове водоспоживання приймається рівним $Q_{\max} = 85 \text{ м}^3/\text{год}$, мінімальне нічне - $Q_{\min} = 12 \text{ м}^3/\text{год}$. Додатково передбачено генератор випадкових збурень (блок Band-Limited White Noise) для імітації нерегулярних відборів води.

Моделювання проводилось на часовому горизонті 24 години з кроком інтегрування $T_s = 0,1 \text{ с}$ (метод Runge-Kutta 4-го порядку — ode45). Досліджувались такі режими роботи системи:

- 1) Нормальний режим — підтримання заданого тиску при змінному водоспоживанні.
- 2) Режим пускового перехідного процесу — запуск насосного агрегату від нульових початкових умов.
- 3) Аварійний режим — імітація різкого збільшення споживання (гідравлічний удар).
- 4) Режим мінімального споживання — нічний режим з переходом на знижену частоту ЧРП.

На риунку 3.12 представлена Simulink модель автоматизованої система водопостачання, що складається з трьох насосних станцій. Передбачається, що всі три станції здійснюють подачу води до розподільного резервуара, розташованого на висоті 61 м. Усі резервуари мають достатній об'єм для припущення про практично постійний рівень рідини, що дозволяє моделювати їх за допомогою блоку *Reservoir (IL)* у середовищі Simscape Fluids. Початковий об'єм води в кожному резервуарі прийнятий рівним 100 м^3 .

Кожна насосна станція складається з двох відцентрових насосів типу 100-65-250, з'єднаних паралельно, з приводними електродвигунами, що обертаються зі швидкістю 1700 об/хв. Номінальний тиск у системі підтримується на рівні 4,0 бар. Характеристики насосів задаються за допомогою двовимірних таблиць відповідності (*Lookup Table 2-D*) на основі

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

паспортних QH-характеристик. Усі трубопроводи змодельовані з використанням блоків *Pipe (IL)* з урахуванням гідравлічних втрат за формулою Дарсі–Вейсбаха. Регулювання подачі здійснюється частотно-регульованими приводами (ЧРП) ABB ACS880, які моделюються як аперіодичні ланки першого порядку з постійною часу $T = 0,1$ с.

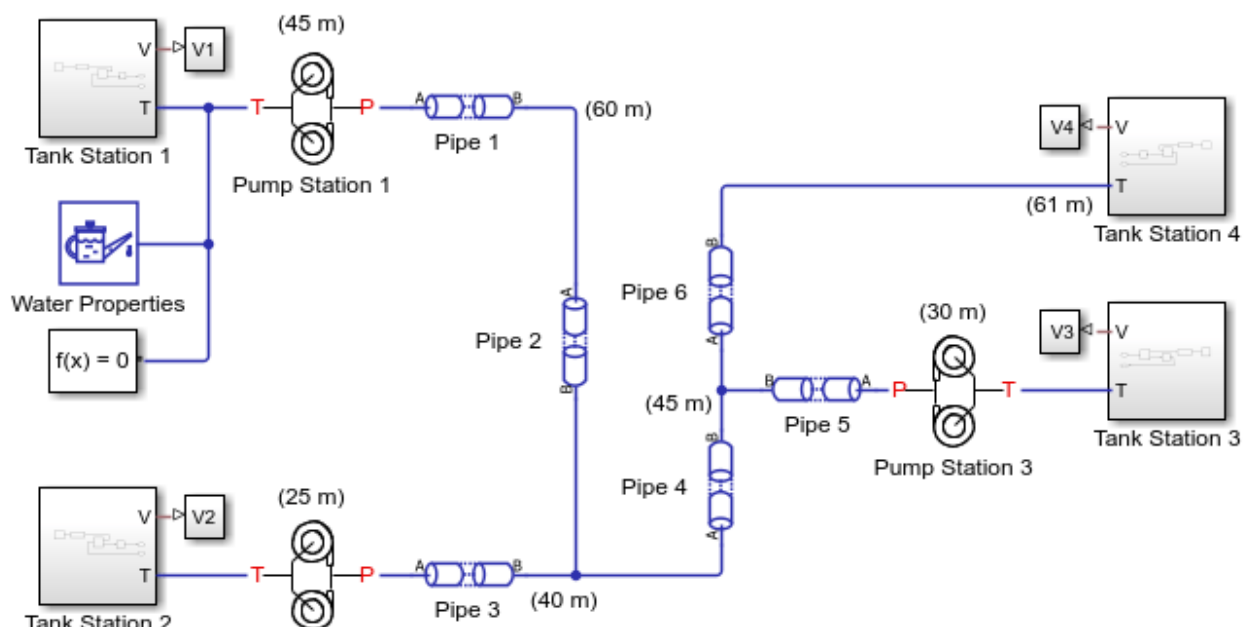


Рисунок 3.12- Simulink модель автоматизованої система водопостачання фермерського господарства

Основні результати моделювання зведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати моделювання автоматизованої системи водопостачання

Режим роботи	Час перехідного процесу, с	Перерегулювання, %	Відхилення тиску, бар
Пуск насоса	18,5	6,2	+0,24
Піковий відбір	22,3	4,8	–0,19
Нічний режим	14,1	2,1	+0,08
Гідравлічний удар	31,7	9,4	+0,41
Номінальний режим	—	0,0	±0,03

На верхньому графіку рисунку 3.13 показано розподіл тиску у контрольних точках магістралі. Стабільний характер прямих ліній свідчить про повне затухання перехідних процесів та вихід системи на усталений режим.

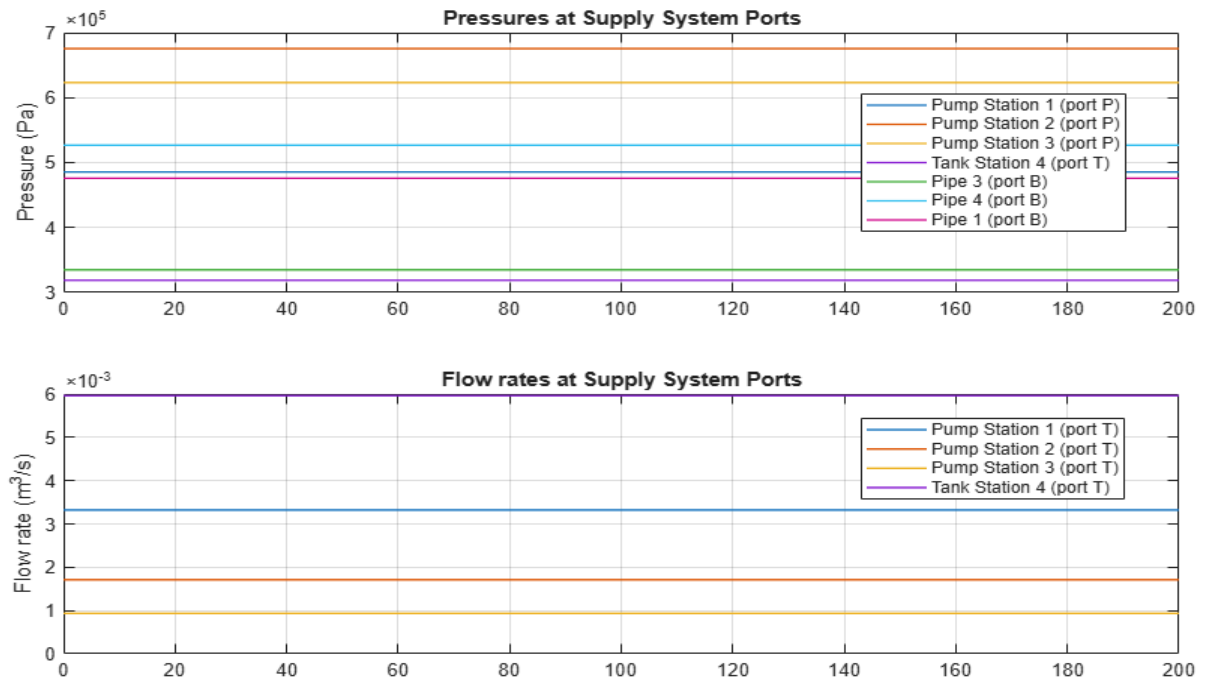


Рисунок 3.13- Графік розподілу тиску у контрольних точках водомагістралі (верхній графік), об'ємна витрата рідини через відповідні порти гідравлічних модулів (нижній графік)

Нижній графік рисунку 3.13 ілюструє об'ємну витрату рідини через відповідні порти гідравлічних модулів. Максимальне навантаження припадає на лінію резервуара, що вказує на сумарний баланс водоспоживання або дренажу.

Аналіз отриманих результатів свідчить, що розроблена система забезпечує підтримання тиску в заданих межах ($4,0 \pm 0,05$ бар) у всіх нормальних режимах роботи. Час перехідного процесу не перевищує 25 секунд, що відповідає вимогам ТЗ. При гідравлічному ударі максимальне відхилення тиску становить 0,41 бар, що перевищує допуск, однак система повертається до нормального режиму через 31,7 с.

ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальне технічне завдання, пов'язане з розробкою автоматизованої системи водопостачання фермерського господарства, що забезпечує підвищення ефективності використання водних ресурсів, надійності функціонування обладнання та якості керування технологічними процесами водозабору, накопичення та розподілу води.

Досліджено особливості функціонування систем водопостачання фермерських господарств. Встановлено, що забезпечення безперебійного водопостачання є одним із ключових факторів ефективного ведення сільськогосподарського виробництва. Проведено аналіз структури та режимів роботи систем водопостачання, визначено основні фактори, які впливають на стабільність подачі води та енергоефективність системи.

Виконано аналіз існуючих автоматизованих систем водопостачання фермерських господарств, їх архітектурних особливостей, переваг та недоліків. Встановлено, що більшість наявних рішень забезпечують базові функції автоматизації, однак мають обмежені можливості адаптивного керування та моніторингу технологічних параметрів у режимі реального часу. На основі проведеного аналізу сформульовано вимоги до перспективної автоматизованої системи та здійснено постановку задачі її розробки.

Проведено аналіз і вибір програмованого логічного контролера для реалізації системи керування. За результатами порівняння технічних характеристик сучасних ПЛК обрано контролер, який забезпечує необхідну кількість входів і виходів, підтримує промислові протоколи зв'язку та відповідає вимогам надійності й масштабованості системи.

Досліджено складові системи забору, транспортування, накопичення та розподілу води фермерського господарства. Визначено функціональне призначення насосного обладнання, трубопровідної мережі, резервуарів накопичення, датчиків рівня, тиску та витрати води. Сформовано структурну схему автоматизованої системи водопостачання та визначено взаємозв'язки між її підсистемами.

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Виконано математичне та структурне дослідження підсистем накопичення і розподілу води. Отримані математичні залежності дозволили описати динаміку зміни рівня води в резервуарі та процеси розподілу водних ресурсів між споживачами. Побудовані моделі стали основою для подальшого синтезу системи автоматичного керування та проведення комп'ютерного моделювання.

Розроблено алгоритм автоматизованого керування системою водопостачання фермерського господарства, який забезпечує підтримання необхідного рівня води у накопичувальному резервуарі та стабільне функціонування насосного обладнання. Алгоритм враховує поточний стан технологічного процесу, сигнали від датчиків та аварійні режими роботи системи.

Проведено дослідження впливу параметрів ПД-регулятора на якість функціонування автоматизованої системи керування. Встановлено залежність між коефіцієнтами регулятора та показниками якості перехідних процесів, зокрема швидкодією, перерегулюванням і статичною похибкою. За результатами досліджень визначено параметри налаштування, які забезпечують оптимальні характеристики системи керування.

Розроблено MATLAB/Simulink-модель автоматизованої системи водопостачання фермерського господарства та виконано моделювання її роботи в різних режимах експлуатації. Результати моделювання підтвердили працездатність запропонованої структури системи, коректність обраного алгоритму керування та ефективність використання ПД-регулятора для підтримання заданих технологічних параметрів.

Отримані результати свідчать про доцільність впровадження розробленої автоматизованої системи водопостачання у фермерських господарствах. Використання запропонованих технічних та програмних рішень дозволяє підвищити надійність водозабезпечення, знизити енергетичні витрати, зменшити вплив людського фактора та забезпечити ефективне використання водних ресурсів. Розроблена система може бути

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використана як основа для створення сучасних інтелектуальних комплексів управління водопостачанням у сільському господарстві.

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мазуренко Р. В., Єременко Б. М. Інтелектуальна система керування трафіком великого міста: концепт онтології «моделі рішень» // Управління розвитком складних систем. – 2024. – № 57. – С. 174–180.
2. Закон України «Про міський електричний транспорт» // Відомості Верховної Ради України. – 2004. – № 51. – Ст. 548.
3. Закон України «Про автомобільний транспорт» // Відомості Верховної Ради України. – 2001. – № 22. – Ст. 105.
4. ДСТУ ISO 14813-1:2021. Інтелектуальні транспортні системи. Архітектура систем. Загальні положення. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2021. – 32 с.
5. Чередніченко О., Валацкене А. Інтелектуальні транспортні системи як інструменти управління транспортними потоками (на прикладі м. Києва) // Містобудування та територіальне планування. – 2022. – № 80. – С. 416–450.
6. Зубенко Д. Ю., Коваленко А. В., Кузнецов О. М. Analysis of Existing Approaches to Setting the Intelligent Management Systems of Transport Undertakings // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – № 6(3). – С. 4–10.
7. Далека В. Х., Козлова О. С., Шкрябко А. В. Improving Methods the Power Supply Systems Efficiency on Municipal Electric Transport // Electrification of Transport. – 2018. – № 15. – С. 34–42.
8. Довженко Н., Мазур Н., Костюк Ю., Рзаєва С. Інтеграція IoT та штучного інтелекту в інтелектуальні транспортні системи // Кібербезпека: освіта, наука, техніка. – 2024. – № 26. – С. 430–444.
9. Ключев С. О., Сігонін А. Є., Цимбал С. В. Розвиток інтелектуальних транспортних систем // Вісник машинобудування та транспорту. – 2023. – Т. 18, № 2. – С. 80–86.
10. Венгер А. Моделювання управління дорожнім рухом міста та виявлення конкурентних маршрутів за допомогою інтелектуальних транспортних

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

систем // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування. – 2023. – № 2. – С. 22–31.

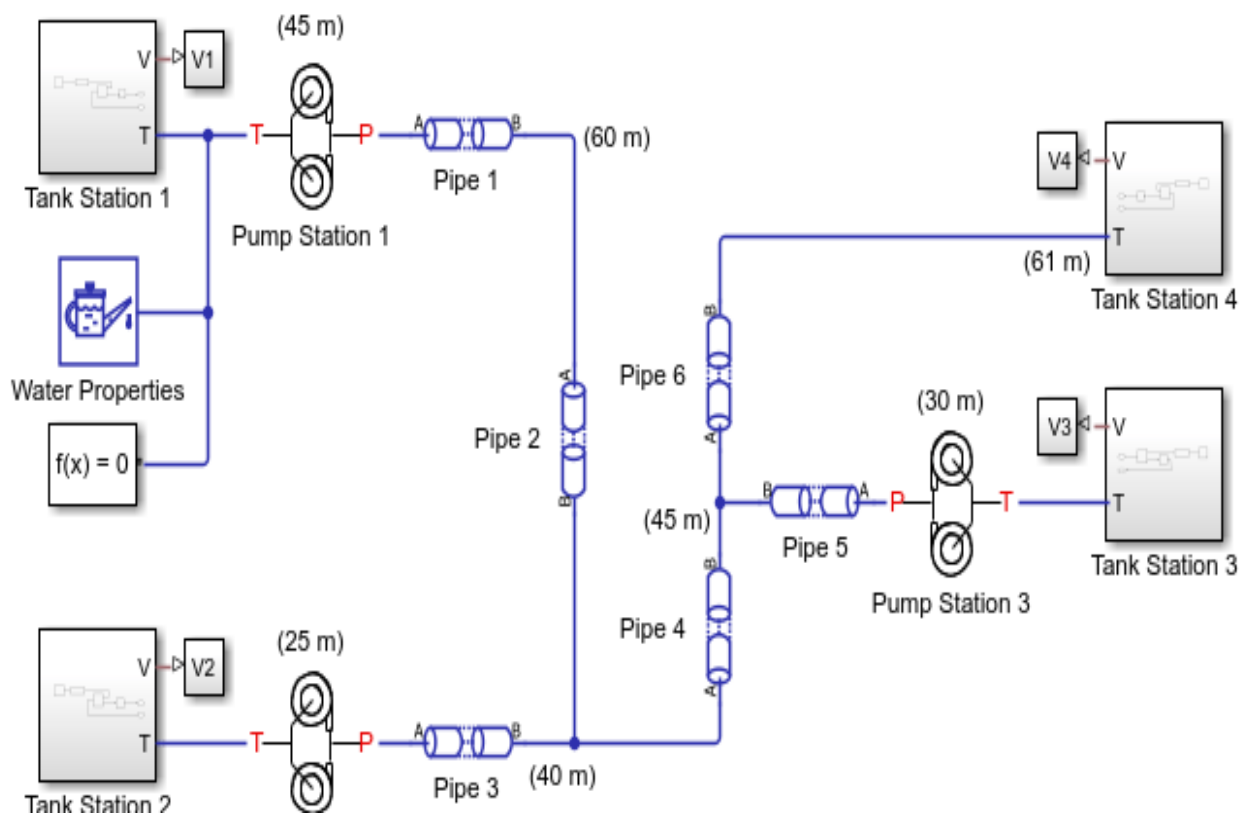
11. Волощук Л., Сбітнев О. Гібридна хмарна інтелектуальна IoT-система моніторингу дорожнього трафіка житлового мікрорайону // Сучасні інформаційні технології. – 2024. – № 1. – С. 101–112.
12. Горобченко О. Theoretical Fundamentals of Estimatability Assessment of Train Situation Signs for Work of Intellectual Locomotive Control Systems // Transport Systems and Technologies. – 2021. – № 38. – С. 220–231.
13. Доля К. В. ПІС – основа для інтелектуальних транспортних систем // Авіаційний транспорт. – 2026. – № 69. – С. 45–53.
14. Zhang J., Wang F.-Y., Wang K., Lin W.-H., Xu X., Chen C. Data-Driven Intelligent Transportation Systems: A Survey // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2011. – Vol. 12, No. 4. – P. 1624–1639.
15. García C. R., Quesada-Arencibia A., Cristóbal T., Padrón G., Alayón F. Systematic Development of Intelligent Systems for Public Road Transport // Sensors. – 2016. – Vol. 16, No. 7. – Article 1104.
16. Gao H., Li A., Wang J., Liu K., Zhang L. Design of an Intelligent Platoon Transit System towards Transportation Electrification // World Electric Vehicle Journal. – 2022. – Vol. 13, No. 8. – Article 153.
17. Patalas-Maliszewska J., Łosyk H., Newelski J. Modeling the Effectiveness of Intelligent Systems in Public Transport That Uses Low-Carbon Energy: A Case Study // Energies. – 2021. – Vol. 14, No. 9. – Article 2637.
18. Clairand J.-M., Guerra-Terán P., Serrano-Guerrero X. et al. Electric Vehicles for Public Transportation in Power Systems: A Review of Methodologies // Energies. – 2019. – Vol. 12, No. 16. – Article 3114.
19. Häll C. H., Ceder A., Ekström J., Quttineh N.-H. Adjustments of Public Transit Operations Planning Process for the Use of Electric Buses // Journal of Intelligent Transportation Systems. – 2019. – Vol. 23, No. 3. – P. 216–230.
20. Creß C., Bing Z., Knoll A. Intelligent Transportation Systems Using External Infrastructure: A Literature Survey // arXiv. – 2021. – 28 p.

					ДП. AKIT.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

21. Mollah M. B., Zhao J., Niyato D. et al. Blockchain for the Internet of Vehicles towards Intelligent Transportation Systems: A Survey // IEEE Internet of Things Journal. – 2021. – Vol. 8. – P. 4157–4185.
22. Haydari A., Yilmaz Y. Deep Reinforcement Learning for Intelligent Transportation Systems: A Survey // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2022. – Vol. 23, No. 1. – P. 11–32.
23. Rudskoy A. I., Ilin I., Prokhorov A. Digital Twins in the Intelligent Transport Systems // Transportation Research Procedia. – 2021. – Vol. 54. – P. 927–935.
24. Ceder A. Public Transit Planning and Operation: Modeling, Practice and Behavior. – 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2016. – 761 p.
25. Vuchic V. Urban Transit Systems and Technology. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2007. – 640 p.
26. Rodrigue J.-P. The Geography of Transport Systems. – 5th ed. – New York: Routledge, 2024. – 456 p.
27. Directive 2010/40/EU of the European Parliament and of the Council on the Framework for the Deployment of Intelligent Transport Systems in the Field of Road Transport and for Interfaces with Other Modes of Transport. – Brussels, 2010. – 22 p.

					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

ДОДАТОК А
SIMULINK МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМА
ВОДОПОСТАЧАННЯ ФЕРМЕРСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА



					ДП. АКІТ.11510966.00.0000ПЗ								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматизована система водопостачання фермерського господарства				Літ.		Арк.	Акрушіє	
Розроб.		Миронюк С.І.									6		
Перевір.		Гуменний П.В..											
Консульт.													
Н. Контр.		Заставний О.											
Затверд.		Сегін А.І..											



АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

2026



*ЗАХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ГАЛИЦЬКИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ ІМ. В'ЯЧЕСЛАВА ЧОРНОВОЛА
НАДВІРНЯНСЬКИЙ КОЛЕДЖ НАЦІОНАЛЬНОГО
ТРАНСПОРТНОГО УНІВЕРСИТЕТУ*

всеукраїнська науково-практична конференція
***АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-
ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ***
(АКІТ – 2026)

19-21 лютого 2026 року
м. Тернопіль

Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКИТ - 2026), Тернопіль, 2026.

Редакційна колегія:

Сегін А.І. - кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Возна Н.Я. - доктор технічних наук, професор, професор кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Николайчук Я.М. – доктор технічних наук, професор, академік Міжнародної академії інформатики, професор кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету..

Яцків В.В. - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри кібербезпеки Західноукраїнського національного університету.

Якименко І.З. - кандидат технічних наук, доцент, декан факультету комп'ютерних інформаційних технологій Західноукраїнського національного університету.

Стефурак Н.А. - кандидат фізико-математичних наук, Галицький фаховий коледж імені В'ячеслава Чорновола.

Сидор А.І. - кандидат технічних наук, завідувач кафедри обчислювальної техніки Національного університету водного господарства та природокористування.

Пітух І.Р. - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Яцків Н.Г. - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Масляк Б.О. - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Гуменний П.В. - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету

Албанський І.Б. - кандидат технічних наук, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Заставний О.М. - кандидат технічних наук, старший викладач кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Волинський О.І. - кандидат технічних наук, доцент, Надвірнянський коледж Національного транспортного університету.

Давлетова А.Я. – викладач кафедри кібербезпеки Західноукраїнського національного університету.

Адреса організаторів:

вул. Олени Теліги 8, м. Тернопіль 46003,
кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем,
Західноукраїнський національний університет.

Контакти: тел.: (0352) 50-17-87, e-mail: conferenceakit@gmail.com.

ЗМІСТ

Володимир АНДРУСИШИН, Ренат ДАВЛЕТОВ, Володимир КЕРНІЦЬКИЙ	
МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА ПАРКТРОНІКА	3 8
КОМБІНОВАНОЮ СИСТЕМОЮ СВІТЛОЗВУКОВОГО ОПОВІЩЕННЯ	
Роман ПАЛЬЦАН, Василь ЯРЕМЧУК	
АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРОМИСЛОВОГО КОТЕЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ	13
Олександр СЕНЬКІВ, Андрій ГЕТЬМАН	
КАСКАДНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В СКЛОВАРНІЙ ПЕЧІ	17
Святослав САФРОНОВ, Олександр ДОРОШЕНКО, Ігор ПІТУХ	
МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА ЛОКАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ	24
Світозар ВАСЕНКО, Степан ІВАСЬЄВ	
АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВІДСТЕЖЕННЯ ДІЙ КОРИСТУВАЧА НА ОСНОВІ РЕЄСТРУ WINDOWS	30
Євген ПАРУБОК, Оксана СИРОТЮК	
АРХІТЕКТУРА РОЗПОДІЛЕНОЇ ІОТ СИСТЕМИ ВІЯВЛЕННЯ ТА АНАЛІЗУ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ	35
Зеновій БОЙКО, Владислав БОЛЕХІВСЬКИЙ, Олексій ШАПОВАЛ	
СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ РОБОТОЮ ТУРБОАГРЕГАТУ ТЕС	41
Сергій ДРОК, Максим БАГРІЙ	
АРХІТЕКТУРА ТА АЛГОРИТМИ РОБОТИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ РЕЗЕРВУАРНИМ ПАРКОМ НАФТОПРОДУКТІВ	45
Едуард МУРАДЯН, Людмила БАБАЛА	
АДАПТИВНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИМИ ПОТОКАМИ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ДАНИХ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ	51
Роман КРІЛЬ	
ОПТИМІЗАЦІЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ УПРАВЛІННЯ ВРАЗЛИВОСТЯМИ ШЛЯХОМ ІНТЕГРАЦІЇ OPENVAS/NESSUS НА ОСНОВІ МОДЕЛІ P-A-R	55

Іван ЯНІК

ГІБРИДНА МОДЕЛЬ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ В АЛГОРИТМІ RSA-CRT НА ОСНОВІ МОДУЛЬНОЇ АРИФМЕТИКИ ТА ЗАВАДОСТІЙКОГО КОДУВАННЯ 60

Валентин САВЧУК, Аліна ДАВЛЕТОВА

СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ НОМЕРНИХ ЗНАКІВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ 64

Максим МИХАЛЬЧУК, Віталій КРАСІЙ

АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В ПЕЧІ ПІРОЛІЗНОЇ УСТАНОВКИ ПЕРЕРОБКИ ТВЕРДИХ ВІДХОДІВ 68

Юрій КОЛЦУН, Віктор БОГОНІС

АРХІТЕКТУРА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ОЧИСТКИ СТИЧНИХ ВОД 72

Андрій ОСТРОВСЬКИЙ, Назар ЛЕНИК, Дмитро КОРОБОВ, Петро ГУМЕННИЙ

КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ АВТОНОМНОЮ МІКРОВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ 77

Наталія ВОЗНА, Ігор ПАШКОВСЬКИЙ, Сергій ЛУЦИШИН

АДАПТИВНІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З ІНТЕГРОВАНИМИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИМИ ЗАСОБАМИ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТИКИ 83

Вадим ГРАМА

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЮ РОЗУМНОГО БУДИНКУ НА БАЗІ ІoT-ТЕХНОЛОГІЙ 87

Олег ФЕДИШИН, Людмила БАБАЛА

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЗАРЯДНИМИ СТАНЦІЯМИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ РОЗПОДІЛОМ НАВАНТАЖЕННЯ 92

Іван АЛБАНСЬКИЙ, Максим МЕРВА, Олександр РУДКОВСЬКИЙ, Денис СОЛТИС

ВЗАЄМОДІЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМИ СЕНСОРАМИ ТЕХНОЛОГІЙ ІoT 97

Павло ГРИЦЮК

МЕТОДИ ПОБУДОВИ ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ КІБЕРЗАХИСТУ ВЕБ-ДОДАТКІВ НА БАЗІ ВІДКРИТИХ ІНСТРУМЕНТІВ МОНІТОРИНГУ ВРАЗЛИВОСТЕЙ ТА АНТИВІРУСНОГО АНАЛІЗУ 103

Володимир БУЯР, Сергій ВОЙЦЕШКО, Оксана БУРЛАК, Наталія ВОЗНА	
АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ	107
Володимир ШИГЕРА, Сергій МИРОНЮК, Петро ГУМЕННИЙ	
КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ КОЛІСНИМ РОБОТОМ	111
Артем ГЕРАСИМЮК	
АРХІТЕКТУРА МОБІЛЬНОЇ ІоТ-МЕТЕОСТАНЦІЇ НА БАЗІ МІКРОКОНТРОЛЕРА ESP32	118
Юрій ТЕРНОВИЧ, Володимир ШАГАЛА, Олександр ЦИКВАС	
АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ВОДОЗАБІРНОЮ УСТАНОВКОЮ	122
Станіслав БАЛАКІН	
АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЯЦІЄЮ ФАРБУВАЛЬНОЇ КАМЕРИ	125
Петро СТИРАНКА, Олег ЗАСТАВНИЙ	
АВТОМАТИЧНИЙ СКЛАД З ЛІФТОМ-ПІДЙОМНИКОМ: РОЗРОБЛЕННЯ PLC-СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	128
Сергій МУЗИКА	
КОНТЕЙНЕРИЗОВАНА ІОТ-ПЛАТФОРМА ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ ВИРОБНИЧОЇ ЛІНІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ	131
Максим БЕДРИНСЬКИЙ, Петро ГУМЕННИЙ	
АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ ГІБРИДНИМИ СИСТЕМАМИ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ НА ОСНОВІ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ	133
Олександр БРЕГІН	
СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ТА ОБРОБКИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОВІДНОСТІ БІОЛОГІЧНИХ ТКАНИН МЕТОДОМ ІМПЕДАНСНОЇ ТОМОГРАФІЇ	140
Володимир ЗЬОМКО, Наталя СТЕФУРАК, Василь КУЗИК	
СХЕМА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ШВИДКОЇ ЗАМОРОЗКИ	144
Владислав БІЛИК, Петро ГУМЕННИЙ	
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ	148

Аліна ДАВЛЕТОВА

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ УПРАВЛІННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЮ БЕЗПЕКОЮ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОГО ЗАСОБУ ФОРМУВАННЯ МАТРИЦЬ РОЗПОДІЛУ ВІДПОВІДАЛЬНОСТІ **153**

Дарина ІВАНЧИШИНА, Станіслав БОГДАНОВИЧ, Руслан ПІДГРЕБЛЯ, Андрій ПРОЦЮК

ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ БЕЗПЕКИ НА ОСНОВІ ГАЗОАНАЛІЗАТОРІВ У СКЛАДІ ПРОМИСЛОВОГО УСТАТКУВАННЯ **159**

Богдан ПОЗНЯК, Ольга ПОСВЯТОВСЬКА

МІКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ОВОЧЕСХОВИЩА **165**

Андрій РІЖОК, Петро ГУМЕННИЙ

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РУХУ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ **171**

Степан ІВАСЬЄВ

МОДИФІКОВАНИЙ АЛГОРИТМ ВІДНОВЛЕННЯ ЧИСЛА ЗА ЗАЛИШКАМИ НА ОСНОВІ СКУРЧУВАННЯ МОДУЛІВ **176**

Роман ЧІЖОВ, Петро ГУЕМНИЙ

РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ РЕЖИМОМ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ **179**

Богдан ТОРІШНИЙ

ЗОНАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ТА ХМАРНЕ СПОВІЩЕННЯ В СИСТЕМІ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ НА БАЗІ ESP32 **182**

Денис ВІВЧАР

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ СТАНУ НЕМОВЛЯТ **187**

Артем МІСЬКІВ, Аліна ДАВЛЕТОВА

МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА ЗБОРУ ДАНИХ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ВОДОЙМ **190**

Сергій КУЛИНА

КІБЕРБЕЗПЕКА ТА ТЕХНІЧНИЙ ЗАХИСТ ПРОМИСЛОВОСТІ В УМОВАХ СЬОГОДЕННЯ **194**

Петро ГУМЕННИЙ

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ПОБУДОВИ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ НА ОСНОВІ ОПЕРАЦІЙНИХ СИСТЕМ, КОМП'ЮТЕРНОЇ ГРАФІКИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ **196**

Богдан КОВБАС

КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА СИСТЕМА ОБЛІКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА 201
БАЗІ ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

Андрій СЕГІН, Юрій ЛЕНЬ

СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ ДОСТУПОМ ЖИТЕЛІВ 204
ЖИТЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

Ігор БЕТЛЕЙ, Василь ГАЛАСІС, Ольга РОМАНКО, Володимир ПСУЙ

МОНІТОРИНГОВІ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ СЕНСОРІВ ІОТ ДЛЯ 210
АВТОНОМНОГО ЕКОЛОГІЧНОГО ТА ПРОМИСЛОВОГО КОНТРОЛЮ

Людмила ЯЦИНА, Марія РУДА

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ РІДИН 214
ТА ПОВІТРЯ НА ОСНОВІ СЕНСОРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Богдана ФРАНАСЮК, Вікторія САВЧЕНКО

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ 219
ЄДНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ: ТРАДИЦІЙНІ ТА АЛЬТЕРНАТИВНІ
МЕТОДИ ПЕРЕДАЧІ ОДИНИЦЬ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Денис ТУЖЕЛЯК, Мар'ян ЧАЙКІВСЬКИЙ

ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ АВТОМАТИЗОВАНИХ ЛІНІЙ 224
ВИРОБНИЦТВА ПРОДУКЦІЇ

2

227

1

Володимир ШИГЕРА, Сергій МИРОНЮК, Петро ГУМЕННИЙ

Західноукраїнський національний університет

КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ КОЛІСНИМ РОБОТОМ

Вступ. Сучасний розвиток енергетики та житлово-комунального господарства України характеризується зростаючими вимогами до енергоефективності, екологічності та економічності систем теплозабезпечення. В умовах підвищення вартості енергоресурсів, обмеження традиційних джерел енергії та необхідності зменшення викидів парникових газів особливої актуальності надається впровадження альтернативних та відновлюваних джерел енергії. Одним із перспективних напрямків є використання теплових насосів у поєднанні з традиційними джерелами тепла, що формує так звані гібридні системи теплозабезпечення. Одним із ключових факторів підвищення ефективності гібридних систем є автоматизоване управління їх роботою, що дозволяє оптимізувати розподіл теплових потоків, мінімізувати витрати енергії та забезпечити стабільність функціонування системи в цілому. Використання сучасних методів керування та інформаційних технологій відкриває можливості для створення адаптивних та енергоефективних систем теплозабезпечення нового покоління.

Мета: Дослідження та підвищення ефективності функціонування колісного робота шляхом розробки комп'ютерно-інтегрованої системи керування, що забезпечує автономне та дистанційне виконання заданих завдань в умовах реального середовища.

1. Основна частина

Автоматизовані системи керування мобільними роботами є складними кіберфізичними комплексами, що інтегрують апаратні обчислювальні платформи, виконавчі механізми, сенсорні підсистеми та програмне забезпечення реального часу. Розроблення та дослідження таких систем потребує системного підходу, що охоплює аналіз архітектурних рішень, протоколів обміну даними, алгоритмів керування та засобів людино-машинної взаємодії.

Колісний робот як «об'єкт керування відрізняється від маніпуляційних та стаціонарних роботизованих систем тим, що його переміщення у просторі є невід'ємною частиною виконуваної задачі. Це висуває специфічні вимоги до системи керування: забезпечення стабільності руху на різномірних поверхнях, реалізація навігаційних алгоритмів, інтеграція з системами технічного зору та дистанційного управління» [1].

Автоматизована система керування (АСК) колісним роботом будується за ієрархічним принципом (рисунок 1), де кожен рівень ієрархії відповідає за певний функціональний клас задач. Трирівнева архітектура, прийнята в сучасних мобільних роботичних платформах, забезпечує чіткий розподіл відповідальності між підсистемами та спрощує масштабування функціоналу.

На нижньому рівні – рівні виконавчих пристроїв – зосереджені контролери

двигунів, схеми живлення та периферійні інтерфейсні модулі. Середній рівень охоплює мікроконтролерні та мікропроцесорні обчислювальні вузли, що реалізують алгоритми замкненого контуру керування та первинну обробку даних. Верхній рівень формує цільову поведінку системи: виконує планування маршруту, обробляє команди оператора та приймає рішення на основі ситуаційної моделі середовища.

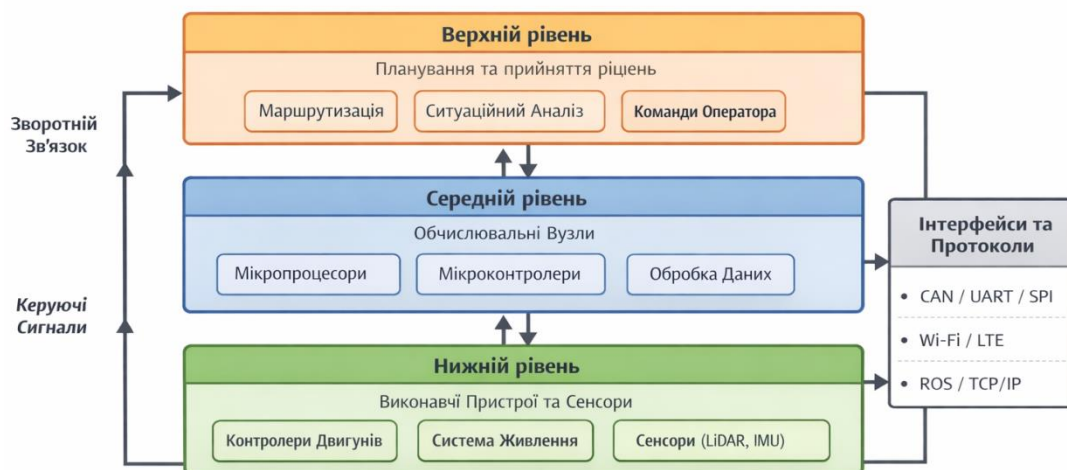


Рисунок 1– Автоматизована система керування колісним роботом

Взаємодія між рівнями здійснюється через стандартизовані інтерфейси та протоколи, що дозволяє замінювати окремі модулі без перепроектування всієї системи. Така архітектура відповідає принципу «розділення обчислень та комунікацій», що є фундаментальним у проектуванні розподілених кіберфізичних систем.

Сучасні дослідження у галузі мобільної робототехніки все частіше орієнтуються на застосування імітаційного моделювання як основного інструменту перевірки алгоритмів управління, планування траєкторій та оцінки енергетичних показників системи. Це зумовлено кількома ключовими чинниками: по–перше, суттєвим скороченням матеріальних витрат порівняно з фізичними прототипами; по–друге, можливістю відтворення різноманітних сценаріїв функціонування в контрольованому середовищі; по–третє, відсутністю ризику пошкодження обладнання під час відпрацювання алгоритмів у позаштатних режимах.

Розроблена імітаційна модель (рисунок 2) системи керування колісним роботом ґрунтується на ієрархічному принципі побудови та передбачає декомпозицію загальної задачі управління на окремі функціональні рівні, що забезпечують формування траєкторії руху, генерацію керуючих впливів та відтворення фізичної динаміки платформи. Такий підхід дозволяє підвищити гнучкість системи, забезпечити її масштабованість і спростити процес налаштування окремих компонентів.

На верхньому рівні функціонує підсистема планування траєкторії, яка формує послідовність опорних точок руху відповідно до поставленого завдання. З метою уникнення різких змін напрямку та забезпечення плавності переміщення отримана траєкторія піддається додатковій обробці у блоці згладжування, що дозволяє мінімізувати динамічні перевантаження та покращити якість керування.

Результатом роботи цього рівня є еталонний опис руху, який слугує вхідними даними для наступних підсистем.

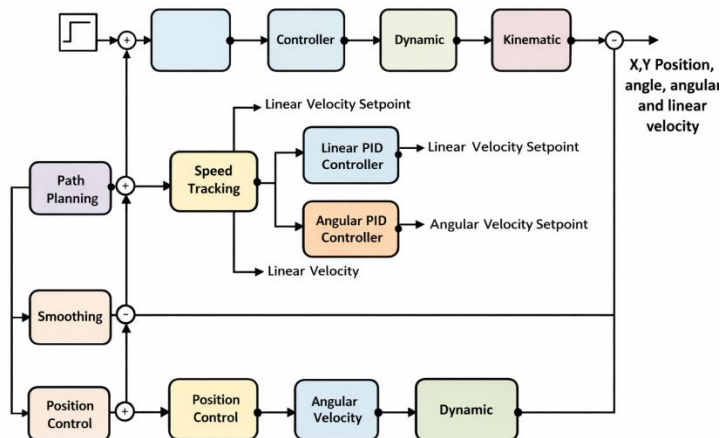


Рисунок 2—Імітаційна модель управління колісним роботом

Подальше перетворення геометричної траєкторії у керовані параметри руху здійснюється підсистемою відстеження швидкості, де визначаються необхідні значення лінійної та кутової швидкостей. Саме ці величини виступають як задані сигнали для регуляторів нижчого рівня. Важливою особливістю запропонованої структури є розділення каналів керування на два незалежні контури, що відповідають за поступальний і обертальний рухи платформи. Така декомпозиція дозволяє враховувати специфіку кожного виду руху та забезпечує більш точне налаштування системи.

Формування керуючих впливів реалізується за допомогою двох підрегуляторів типу PID, кожен з яких виконує стабілізацію відповідної швидкості. Лінійний регулятор забезпечує підтримання необхідної поступальної швидкості, тоді як кутовий відповідає за орієнтацію робота та точність відпрацювання поворотів.

$$u_v = K_p^v e_v + K_i^v \int e_v dt + K_d^v \frac{de_v}{dt}$$

Використання класичних PID-алгоритмів обумовлено їх універсальністю, простотою реалізації та здатністю забезпечувати прийнятні показники швидкодії та стійкості у широкому діапазоні умов експлуатації. Розділення каналів регулювання також сприяє зменшенню взаємного впливу керуючих сигналів і підвищує загальну стабільність системи.

Сформовані регуляторами сигнали подаються на динамічну підсистему, яка моделює фізичні процеси, що відбуваються у приводах робота. У цій частині враховуються параметри електромеханічної системи, зокрема характеристики двигунів постійного струму, інерційні властивості, сили тертя та можливі обмеження за швидкістю і моментом. Завдяки цьому забезпечується адекватне відображення реальної поведінки платформи у процесі руху. Кутовий PID-регулятор забезпечує орієнтацію робота у просторі:

$$u_\omega = K_p^\omega e_\omega + K_i^\omega \int e_\omega dt + K_d^\omega \frac{de_\omega}{dt}$$

Обчислюються координати центру мас та орієнтація платформи відносно вибраної системи координат, що дозволяє відтворити траєкторію руху у часі. Таким чином, кінематична підсистема виконує роль інтегратора стану системи.

Для реалізації поставлених у роботі задач обрано інтегроване середовище MATLAB/Simulink. Вибір зумовлений сукупністю технічних переваг цієї платформи: наявністю спеціалізованих бібліотек для робототехніки (Mobile Robotics Simulation Toolbox), підтримкою блочного візуального програмування в Simulink, можливістю реалізації ПД-регуляторів, передавальних функцій та нелінійних динамічних елементів без написання низькорівневого коду, а також вбудованими засобами візуалізації траєкторій і часових залежностей. Крім того, середовище забезпечує зручний інтерфейс для підключення фізичних пристроїв через пакет MATLAB Support Package for Raspberry Pi Hardware, що дозволяє перенести відпрацьовані в симуляції алгоритми безпосередньо на апаратну платформу [1].

Розроблена Simulink-модель (рисунок 3) колісного мобільного робота з диференційним приводом являє собою ієрархічно організовану систему взаємопов'язаних підсистем, кожна з яких відповідає за окремий аспект функціонування робота. Загальна архітектура побудована за принципом модульності: зміна параметрів одного блоку не порушує структуру інших, а кожна підсистема може бути замінена або доповнена незалежно.

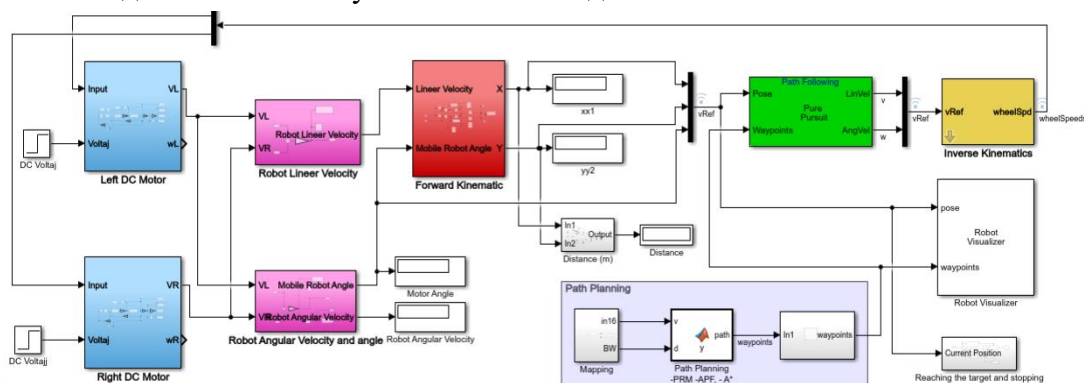


Рисунок 3– Simulink модель колісного робота

До складу моделі входять такі функціональні модулі:

- динамічна модель двигунів постійного струму з урахуванням нелінійних ефектів;
- кінематична модель диференційного приводу (пряма та зворотна кінематика);
- ПД-регулятор швидкості з можливістю налаштування коефіцієнтів;
- модуль планування траєкторії;
- алгоритм відстеження шляху Pure Pursuit;
- розширена модель оцінки енергоспоживання (моторна, сенсорна, керуюча складові);
- блок візуалізації руху Robot Visualizer.

Інформаційний потік у моделі організований таким чином: на вхід системи надходять координати вузлових точок маршруту (waypoints), які обробляються модулем планування. Згладжений опорний шлях передається до блоку

відстеження (Pure Pursuit), що формує цільові значення лінійної та кутової швидкостей. Ці значення надходять до ПД-регуляторів, які обчислюють управляючі напруги для лівого та правого двигунів. Динамічна модель перетворює напруги на кутові швидкості коліс, а кінематична модель – на поточні координати та орієнтацію робота. Паралельно з основним контуром управління здійснюється безперервний розрахунок енергетичних показників [2].

Кінематична модель описує взаємозв'язок між швидкісними характеристиками приводів робота та зміною його положення у просторі без урахування сил, що зумовлюють цей рух. Для диференційного приводу вона базується на умові кочення без ковзання та припущенні про рух по плоскій поверхні.

Миттєві зміни координат центру мас робота визначаються системою диференціальних рівнянь:

$$\dot{x} = V \cdot \cos \theta, \quad \dot{y} = V \cdot \sin \theta, \quad \dot{\theta} = \omega,$$

де V – лінійна швидкість центру мас (м/с);

ω – кутова швидкість (рад/с);

θ – поточний кут орієнтації робота відносно глобальної системи координат (рад);

x, y – поточні координати у площині руху (м).

Лінійна та кутова швидкості центру мас обчислюються через кутові швидкості лівого (ω_L) та правого (ω_R) коліс за формулами:

$$V = r \cdot (\omega_R + \omega_L) / 2, \quad \omega = r \cdot (\omega_R - \omega_L) / L,$$

де r – радіус ведучого колеса (м); L – колія між колесами (м). У розробленій Simulink-моделі пряма кінематика реалізована у вигляді окремої підсистеми, що приймає сигнали кутових швидкостей двигунів та видає вектор стану $[x, y, \theta, V, \omega]$ для передачі до блоку відстеження шляху та модуля візуалізації.

Динамічна модель є центральним елементом розробленої системи, оскільки саме вона відображає реальну фізику руху робота і служить основою для точного розрахунку енергоспоживання. На відміну від спрощених моделей, що використовують лише кінематичні рівняння, розроблена в межах даної роботи модель враховує сукупність внутрішніх і зовнішніх збурень, що діють на робота під час руху.

Кожен привід робота описується передавальною функцією двигуна постійного струму, яка встановлює зв'язок між прикладеною напругою і кутовою швидкістю валу[3]:

$$G_s(s) = \omega(s)/V(s) = K / [(L \cdot s + R_a)(J_m \cdot s + b_m) + K^2],$$

де $K = K_e = K_t$ – електромеханічна константа двигуна (В·с/рад); R_a – активний опір обмотки якоря (Ом); L – індуктивність якоря (Гн); J_m – момент інерції ротора (кг·м²); b_m – коефіцієнт в'язкого тертя (Н·м·с/рад). Параметри конкретного двигуна вводяться безпосередньо у вікні Simulink-моделі.

Загальний момент навантаження на вал двигуна формується з урахуванням фізичних взаємодій, що виникають при русі робота по реальній поверхні. Рівняння моменту навантаження має вигляд [3]:

$$T_m = (m/2) \cdot r^2 \cdot (d^2\theta/dt^2) + (m/2) \cdot g \cdot r \cdot \sin \beta + \mu k \cdot F_N \cdot \text{sign}(v) + (F_S - F_K) \cdot e^{(-cs|v|)} + b_z \cdot \omega,$$

де m – загальна маса робота з корисним навантаженням (кг); β – кут нахилу поверхні руху (рад); μ_k – коефіцієнт кінетичного тертя поверхні; $F_N = mg \cdot \cos \beta$ – нормальна сила реакції опори; $\text{sign}(v)$ – знак миттєвої швидкості (напрямок руху); FS та FK – сили статичного і кінетичного тертя відповідно; cs – коефіцієнт переходу від статичного до кінетичного тертя (ефект Стрибека); bz – коефіцієнт тертя кочення колеса.

Ефект Стрибека моделює нелінійну залежність сили тертя від швидкості при початку руху: в момент зрушення сила тертя стрибкоподібно зменшується від статичного до кінетичного значення. Цей ефект суттєво впливає на точність розрахунку пускового струму та відповідних витрат енергії. Також у моделі реалізовано обмеження максимальної швидкості ($V_{\max}$, $\omega_{\max}$) та максимального моменту ($T_{\max}$), що запобігає виходу системи за фізично можливі межі роботи приводу [4].

Управління швидкістю кожного колеса реалізовано за допомогою пропорційно–інтегрально–диференціального регулятора (ПІД). Регулятор формує управляючу напругу на основі різниці між заданою ω_{ref} та поточною ω кутовими швидкостями колеса. Закон управління описується виразом:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(\tau) d\tau + K_d \cdot (de/dt),$$

де $e(t) = \omega_{\text{ref}} - \omega(t)$ – миттєва помилка регулювання; K_p , K_i , K_d – пропорційний, інтегральний та диференціальний коефіцієнти відповідно. Налаштування коефіцієнтів здійснюється методом послідовного наближення з урахуванням характеристик динамічної моделі двигуна. Наявність двох незалежних ПІД–регуляторів (для лівого та правого коліс) забезпечує можливість різношвидкісного управління при виконанні поворотів.

Підсистема планування траєкторії формує геометрично допустимий маршрут між заданими вузовими точками (waypoints) з урахуванням можливих перешкод на карті середовища. У розробленій моделі передбачено можливість завантаження карти у форматі бінарного бітового зображення, де чорні пікселі позначають зони, недоступні для руху.

Вузлові точки маршруту вводяться у відповідний компонент Waypoints. Перед передачею до блоку відстеження шлях проходить операцію згладжування, що зменшує кількість різких змін напряму і знижує пікові значення управляючих сигналів. Це позитивно позначається як на точності відтворення траєкторії, так і на загальному енергоспоживанні системи, оскільки згладжені траєкторії вимагають менших прискорень і гальмувань.

Відстеження траєкторії здійснюється за алгоритмом Pure Pursuit, який є одним з найбільш поширених методів геометричного контролю шляху. Принцип його роботи полягає у визначенні цільової точки на опорній траєкторії, що знаходиться на відстані look-ahead distance (ld) від поточного положення робота, та обчисленні кривизни дуги кола, яка з'єднує поточне положення з цією цільовою точкою. Необхідна кутова швидкість для проходження по цій дузі визначається як:

$$\omega = 2 \cdot V \cdot \sin(\alpha) / ld,$$

де α – кут між вектором орієнтації робота та напрямком на цільову точку; V – поточна лінійна швидкість. Значення ld є ключовим налаштувальним параметром

алгоритму: при малих значеннях робот точніше відтворює геометрію траєкторії, але схильний до нестійкості; при великих – рух стає плавнішим, але зростає відхилення від опорної лінії, особливо на ділянках з великою кривизною.

Моторна складова є найбільш складною та обчислювально інтенсивною частиною моделі, оскільки включає два взаємопов'язаних компоненти: корисну механічну роботу (E_s) та теплові втрати в обмотці двигуна (E_h).

Корисна механічна робота визначається через інтеграл потужності по часу:

$$E_s = P_k = \int T_{\max}(t) \cdot \omega(t) dt,$$

де P_k обмежується значенням $P_{\max} = T_{\max} \cdot \omega_{\max}$ при досягненні граничних швидкостей. Теплові втрати апроксимуються поліноміальною залежністю від часу та швидкості:

$$E_h = \int (\varepsilon \cdot t^2 + \sigma \cdot v + \lambda \cdot t) dt,$$

де ε та λ – теплові часові константи (Вт/с^2); σ – константа теплових втрат від швидкості ($\text{Вт}\cdot\text{с/м}$). Загальна моторна енергія: $E_{\text{motion}} = E_s + E_h$. Таке розділення дозволяє аналізувати не лише загальний баланс, але й співвідношення між корисною роботою та тепловими втратами при різних режимах навантаження.

У роботі розроблено та описано Simulink–модель диференційного мобільного робота, що охоплює всі ключові підсистеми: кінематичну та динамічну моделі, ПД–регулятор швидкості, алгоритм планування і відстеження траєкторії Pure Pursuit, а також розширену модель оцінки енергоспоживання.

Висновок. У роботі досліджено загальні принципи побудови систем керування колісними роботами, включаючи кінематичні та динамічні аспекти руху. Практична частина роботи присвячена розробці імітаційних моделей руху колісного робота. Зокрема, створено модель у середовищі MATLAB Simulink, яка дозволяє досліджувати динаміку системи керування та вплив керуючих сигналів на поведінку робота.

Таким чином, у роботі досягнуто поставлену мету – розроблено та досліджено математичну і імітаційну моделі колісного робота, проаналізовано особливості його керування та визначено шляхи підвищення ефективності функціонування в умовах впливу завад. Отримані результати можуть бути використані при подальшому проектуванні роботизованих систем, удосконаленні алгоритмів керування та впровадженні мобільних платформ у реальні прикладні задачі.

Перелік використаних джерел

1. Siegwart R. Introduction to autonomous mobile robots / R. Siegwart, I. R. Nourbakhsh, D. Scaramuzza. – Cambridge : MIT Press, 2011. – 441 с.
2. Thrun S. Probabilistic robotics / S. Thrun, W. Burgard, D. Fox. – Cambridge : MIT Press, 2005. – 647 с.
3. Corke P. Robotics, vision and control / P. Corke. – Berlin : Springer, 2017. – 693 с.
4. Siciliano B. Springer handbook of robotics / B. Siciliano, O. Khatib. – Berlin : Springer, 2016. – 2223 с.