ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНО – ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО
Завідувач кафедри
к.ф.-м.н., І.І.Чичура
_____
«___»_____ 2024 р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної бакалаврської роботи

на тему :

# БЛОК КЕРУВАННЯ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ

Виконав:
Тураній Олександр Валерійович _____
(прізвище, ім’я, по-батькові) (підпис)

Науковий керівник:
Тютюнников С.В., ст.викл. _____
(вчене звання, ПІБ, посада) (підпис)

Ужгород – 2024

АКІТ 2024

**Ужгородський національний університет**

Інженерно-технічний факультет
Кафедра приладобудування
Освітньо-кваліфікаційний рівень "Бакалавр"
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

к.ф.-м.н., доц. Чичура І.І.

_____

"___"_____ 2024 р.

**З А В Д А Н Н Я**
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**
Туранію Олександру Валерійовичу
**(прізвище, ім'я, по батькові)**

1. Тема роботи «Блок керування вологості ґрунту»
та керівник роботи Тютюнников Сергій Валентинович, старший викладач,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені Розпорядженням № ___ по ІТФ від " ___ "_____ 2024 року.

2. Строк подання студентом роботи на кафедру: "15" червня 2024 року.

3. Вихідні дані до роботи: об'єктом розробки є автоматизований блок керування вологості ґрунту при вирощування озимої пшениці. Це забезпечується автоматичним поливом на основі аналізу вологості ґрунту. Розробити всі необхідні вузли пристрою та запрограмувати його.

Умови експлуатації пристрою:

- температура навколишнього середовища від - 30°С до +60 °С;
- атмосферний тиск від 700 до 800 мм.рт.ст.;
- відносна вологість повітря до 95 %;
- механічні параметри для портативних пристроїв.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ. Аналіз технічного завдання. Автоматизовані системи поливу рослин. Аналіз об'єкту проектування: види концентрації вологості, методи вимірювання вологості ґрунту. Математична модель системи автоматичного регулювання вологості ґрунту. Блок керування вологості грунту. Висновки. Перелік джерел посилань. Додатки.

АКІТ 2024

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

- функціональна (або структурна) електрична схема пристрою;
- принципова електрична схема;
- алгоритм роботи пристрою;
- ілюстративний матеріал

6. Консультанти розділів роботи:

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

7. Дата видачі завдання: 15 лютого 2023 року.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів виконання бакалаврської роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітки |
|---|---|---|---|
| 1 | Аналіз існуючих рішень | *28.02.2024* | |
| 2 | Огляд сучасних наукових підходів до проектування автоматизованих пристроїв | *20.03.2024* | |
| 3 | Аналіз завдання та розробка функціональної схеми. | *30.03.2024* | |
| 4 | Підбір елементів та виготовлення креслень основних вузлів пристрою.. | *30.04.2024* | |
| 5 | Розробка алгоритму. | *15.05.2024* | |
| 6 | Моделювання режимів роботи. | *30.05.2024* | |
| 7 | Написання пояснювальної записки. | *10.06.2024* | |
| 8 | Оформлення роботи та графічного матеріалу. | *15.06.2024* | |

АКІТ 2024

# РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до бакалаврської роботи : 55 сторінок, 28 рисунків, 3 додатки, 12 джерел посилань.

**ҐРУНТ, ВОЛОГІСТЬ, БЛОК КЕРУВАННЯ**

Об’єкт дослідження – пристрій для регулювання вологості ґрунту.

Мета роботи – розробити блок керування вологості ґрунту, включаючи: математичну модель, алгоритм, функціональну та електричну принципову схеми, а також програмний код.

Методи дослідження – аналіз існуючих подібних приладів, їх технічних характеристик, специфікацій тощо. Огляд літератури, наукових статтей та експериментальних даних.

Сформовано та проаналізовано на стійкість за трьома критеріями математичну модель системи автоматичного регулювання вологості ґрунту.

Розроблено пристрій для регулювання вологості ґрунту, а також його алгоритм, функціональну та електричну принципову схеми, які представлені у графічних матеріалах бакалаврської роботи.

Пристрій використовує стабілізатор напруги L7809CV, який перетворює напругу з 12В до 9В постійного струму. Це дозволяє вберегти компоненти від надмірного значення напруги, що може призвести до перегріву та виводу їх з ладу.

АКІТ 2024

## ABSTRACT

Explanatory note to the bachelor's thesis: 55 pages, 28 figures, 3 appendices, 12 references.

**SOIL, HUMIDITY, CONTROL UNIT**

The object of research is a device for regulating soil moisture.

Purpose - to develop a soil moisture control unit, including: mathematical model, algorithm, functional and electrical schematic diagrams, as well as program code.

Research methods - analysis of existing similar devices, their technical characteristics, specifications, etc. Literature review, scientific articles and experimental data.

The mathematical model of the system of automatic soil moisture control was formed and analysed for stability according to three criteria.

A device for regulating soil moisture was developed, as well as its algorithm, functional and electrical schematic diagrams, which are presented in the graphic materials of the bachelor's thesis.

The device uses the L7809CV voltage regulator, which converts the voltage from 12V to 9V DC. This protects the components from excessive voltage, which can lead to overheating and damage.


АКИТ 2024

## ЗМІСТ

ВСТУП……..……..…..…….…….……....8
1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ……..……...……9
2 АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ПОЛИВУ РОСЛИН…..…….…….……10
2.1 Крапельна система поливу……...10
2.2 Спрінклерна система поливу…….……..12
2.3 Підґрунтова система поливу ……...13
3 ВИДИ КОНЦЕНТРАЦІЇ ВОЛОГОСТІ……..……15
3.1 Види концентрації вологості……...15
3.2 Методи вимірювання вологості ґрунту……..17
3.2.1 Гравіметричний метод……..17
3.2.2 Метод нейтронного розсіювання……19
3.2.3 Тензіометричний метод……19
3.2.4 Ємнісний метод……..21
4 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ…….……...23
4.1 Розробка функціональної схеми САР…….……23
4.2 Визначення передатних функцій ланок, що входять до складу САР……..24
4.3 Розробка структурної схеми САР…….……..25
4.4 Знаходження передатних функцій та складання характеристичного рівняння САР……..26
4.5 Аналіз стійкості САР……28
4.5.1 Аналіз стійкості САР за критерієм Гурвіца……28
4.5.2 Аналіз стійкості САР за критерієм Михайлова……...29
4.5.3 Аналіз стійкості САР за критерієм Найквіста……34
4.6 Визначення меж стійкості САР методом D-розбиття……...36

АКІТ 2024

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | КБР.АКІТ.20050048.01.000 ПЗ | | | |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | | | |
| Розробив | | Тураній О.В. | | | Блок керування вологості ґрунту. Пояснювальна записка | Літ. | Аркуш | Аркушів |
| Перевірив | | Тютюнников С.В. | | | | У | 6 | 55 |
| | | | | | | УжНУ, ІТФ, Кафедра ПБ, 4 курс, денна форма | | |
| Н.Контр. | | | | | | | | |
| Затв. | | Чичура І. І. | | | | | | |

5 БЛОК КЕРУВАННЯ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ……40
5.1 Основні електронні компоненти, які використовуються в блоці керування вологості ґрунту……...40
5.1.1 Ємнісний вологомір……...40
5.1.2 Мікроконтролер Arduino Nano……41
5.1.3 Електромеханічне реле……42
5.1.4 Стабілізатор напруги……43
5.2 Блок керування вологості ґрунту……...45
ВИСНОВКИ……48
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ……50
ДОДАТКИ……...52
Додаток А. Таблиця густини і тиску насиченої водяної пари за температури від 0 до 30°С……52
Додаток Б. Програмний код блоку керування вологості ґрунту ……...53
Додаток В. Перелік елементів, які використовуються у блоці керування вологості ґрунту……55

АКІТ 2024

# ВСТУП

Вимірювання та керування вологості ґрунту має дуже важливе значення. Це дозволяє кількісно оцінити потребу в зрошенні заздалегідь, до того, як культура покаже ознаки неблагополуччя. Знання стану вологості ґрунту дозволяє проводити високоефективне зрошення, надаючи воду тоді, коли вона необхідна, і усуваючи марнотратне використання води, коли зрошення не потрібне.

Середня врожайність сільськогосподарських культур безпосередньо пов'язана з ефективними діями, які підвищують вологість ґрунту на глибині кореневої системи.

Надмірна вологість ґрунту може викликати ряд захворювань, які небезпечні на всіх стадіях розвитку культури. Втрату врожаю можна запобігти, контролюючи рівень вологості в режимі реального часу.

Витрати на електроенергію, також можна зменшити, зрошуючи коротшими проміжками часу, де і коли це необхідно.

Дана робота ставить перед собою мету розробити систему, яка буде контролювати вологість ґрунту за відсутності власника. Варто додати, що ця система діятиме як і моніторинговий модуль, оскільки стан вологості ґрунту можна буде переглянути на екрані дисплея.

Але ця робота не обмежується лише розробкою блоку керування. В ній також буде розглянуто сучасні системи поливу рослин, поняття і види концентрацій вологості, методи вимірювання вологості ґрунту та розроблено математичну модель системи керування вологості ґрунту.

Важливо відмітити те, що у цій роботі буде описано структуру блоку керування вологості ґрунту з відповідними схемами, алгоритм та кожен компонент, який в ньому використовується, а також наведено повний програмний код.

АКІТ-2024

# 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

Завданням бакалаврської роботи є розробка макету блоку керування вологості ґрунту, написання програмного коду та синтез відповідних схем. Така система повинна виконувати наступний ряд умов:

- регулювання вологості має бути в межах 45-55% від кілограму сухого ґрунту;
- процес регулювання повинен відбуватись без участі людини;
- невеликі габарити системи;
- виведення результатів на дисплей.

Давайте розглянемо чому було обрано саме ці умови.

Дана система автоматичного регулювання вологості ґрунту призначена для вирощування озимих культур пшениці, які потребують 45-55% вологості від кілограму сухого ґрунту, тому в умовах, що має виконувати система, зазначено відповідний діапазон.

Полив повинен відбуватись автоматично, щоб власник не витрачав зайвий час на постійний моніторинг та ручне налаштування поливу.

Дана розробка направлена на використання у малих або середніх сільських господарствах. Невеликі габарити блоку керування потрібні для того, щоб надалі він міг бути інтегрований у теплицю, парник чи приміщення невеликих розмірів.

Для розуміння стану системи (а саме чи задіяно водяний насос на поточний момент) та рівня вологості ґрунту, потрібно виводити результати на дисплей, щоб переглянути їх у будь-який момент.

АКІТ 2024

# 2 АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ПОЛИВУ РОСЛИН

Системи поливу рослин — це комплекс обладнання та інфраструктури, який забезпечує автоматизований або ручний полив рослин. Ці системи розроблені для оптимального забезпечення рослин водою, щоб підтримувати їх ріст, розвиток та здоров'я в контрольованих умовах теплиці.

Дані системи виконують ряд функцій :

а) ефективне використання води – системи поливу дозволяють оптимізувати використання води, зменшуючи втрати через випаровування;

б) регулювання вологості – контроль вологості ґрунту для підтримки оптимальних умов росту рослин;

в) автоматизація процесу – забезпечення автоматичного поливу зменшує необхідність в ручному управлінні, що зекономить час та ресурси;

г) контроль над якістю води – фільтраційні системи допомагають забезпечити, що вода, яка використовується для поливу, є чистою і безпечною для рослин.

Розглянемо 3 найпоширеніші типи автоматизованих систем поливу рослин, а саме: крапельну, спрінклерну та гідропонічну.

## 2.1 Крапельна система поливу

Крапельний полив — це автоматизована система, яка забезпечує точне нанесення води безпосередньо до коренів рослин через спеціальні крапельниці або мікротрубки з отворами. Ця система є ефективним способом поливу для теплиць та городів, оскільки дозволяє економно використовувати воду і забезпечує рівномірний доступ до вологи для рослин.

АКІТ 2024

Рисунок 2.1 – Крапельна система поливу [1]

В основному такі системи складаються з:

- центральної труби, через яку подається вода з джерела до крапельниць;
- елементів, які розподіляють воду в краплях або малих струменях безпосередньо до коренів рослин – це можуть бути крапельниці або мікротрубки;
- фільтрів, які використовуються для очищення води від силікатів, піску та інших часток, щоб запобігти забрудненню крапельниць;
- регулятора тиску, що контролює тиск у всій системі та забезпечує рівномірний розподіл води; клапанів та таймерів, тобто автоматичних управляючих пристроїв, які регулюють час та тривалість поливу.

Системи крапельного поливу досить ефективно використовують воду, тим самим збільшуючи її економію за рахунок мінімізації втрат через випаровування та інших факторів. Також вони забезпечують рівномірний доступ до вологи для кожної рослини в теплиці й мають можливість автоматичного управління часом та інтенсивністю поливу за допомогою таймерів та клапанів.

Якщо ж розглядати недоліки даних систем, то для запобігання забрудненню крапельниць потрібна чиста вода, а для її очищення використовують фільтри та інші елементи, які також потребують регулярного чищення та технічного обслуговування.

АКІТ 2024

Варто зазначити, що незважаючи на дані недоліки, системи крапельного поливу залишаються ефективним, економічним та екологічно чистим способом поливу, який підходить для різноманітних сільськогосподарських угідь, включаючи теплиці, городи та плантації.

### 2.2 Спрінклерна система поливу

Спрінклерна система поливу – це автоматизована система, яка розпилює воду над рослинами у вигляді фонтанів або струменів. Ця система ефективно поливає великі площі, забезпечуючи рівномірний розподіл води по всій площі теплиці або городу.

Рисунок 2.2 – Спрінклерна система поливу [2]

Спрінклерні системи поливу складаються з:

- основної магістральної труби, через яку подається вода з джерела до спрінклерів;
- самих спрікнлерів – пристроїв, які розпилюють воду в різних напрямках і зонах, забезпечуючи рівномірний полив;
- фільтрів, функції яких аналогічні до функцій фільтрів крапельних систем;
- насосів, які використовуються для надання необхідного тиску води в системі;
- клапанів та таймерів, які регулюють час та тривалість поливу.

Звісно, що спрінклерна система ідеально підходить для поливу великих територій, таких як великі теплиці або сільськогосподарські плантації. Також спрінклери можна програмувати для автоматичного поливу за певним графіком, що зменшує необхідність ручного управління.

Варто зазначити, що дані системи мають ряд недоліків. Спрінклерна система може втрачати воду через випаровування, особливо в гарячі погодні умови. Крім того, полив через спрінклери може призвести до забруднення рослин, особливо якщо полив проводиться у вечірні години, коли рослини не встигають висохнути.

Проте, ці системи поливу є ефективним рішенням для великих аграрних угідь, де потрібно забезпечити рівномірний полив великих площ. Вони дозволяють автоматизувати процес поливу, що зменшує фізичні та часові витрати. Однак важливо враховувати потреби рослин у воді, ефективність використання води та потенційні недоліки спрінклерного поливу при виборі оптимального методу поливу для конкретних умов і рослинних культур.

### 2.3 Підґрунтова система поливу

Підґрунтова система поливу — це автоматизований метод зрошення, при якому вода подається безпосередньо до кореневої зони рослин через систему труб, розташованих під землею. Ця система забезпечує оптимальне використання води, зменшуючи її втрати через випаровування та забезпечуючи більш рівномірний розподіл вологи.

Рисунок 2.3 – Підґрунтова система поливу [3]

АКІТ 2024

Підґрунтові системи поливу поділяються на капілярні, крапельні та зональні.

У капілярних системах вода подається через капілярні трубки, розташовані на певній глибині під поверхнею ґрунту. Вона поступово просочується до кореневої зони через маленькі отвори. Дані системи забезпечують ефективне використання води, зменшення випаровування та зниження витрат на енергію. Однак, вони мають високі початкові витрати на встановлення, виникає ризик засмічення трубок та необхідність ретельного планування системи.

Якщо розглядати підґрунтові крапельні системи, то в них вода подається через спеціальні крапельниці, вбудовані в труби, розташовані під поверхнею ґрунту. Ці системи виконують точний контроль над кількістю води, знижують втрати води та зменшують ріст бур'янів. Аналогічно до капілярних систем, крапельні системи мають високі витрати на встановлення, можливість засмічення крапельниць, а також виникає складність їх обслуговування.

Підґрунтові зональні системи розбиваються на окремі зони, кожна з яких поливається окремо. Перевагами таких систем є те, що вони мають можливість контролювати полив окремих зон та добре економлять воду. Недоліками ж виступають необхідність складної системи контролю та висока вартість встановлення.

АКІТ 2024

# 3 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ

## 3.1 Види концентрації вологості

Вологість повітря – досить широке поняття, під яким прийнято розглядати максимально допустиме насичення повітря вологою. Абсолютна вологість має на увазі певну кількість (грам) водяної пари в 1 м$^3$ повітряних мас. Враховуючи той факт, що абсолютна вологість не дозволяє отримати повноцінну «картину» що усього, що відбувається, найчастіше використовують відносну [4].

Вологість повітряних потоків залежить від декількох чинників:

а) кліматичний пояс;

б) тиск в атмосфері;

в) сезон;

г) погодні умови [4].

Абсолютна і відносна вологість – це два взаємопов'язаних між собою поняття. При цьому відносна здатна продемонструвати певне співвідношення між номінальними масами вологи в 1 одиниці об'єму повітря, а також тією величиною, при якій відбувається утворення конденсату [4].

Абсолютна вологість — це маса водяної пари, яка міститься в одному кубічному сантиметрі повітря за даної температури. Інакше кажучи, абсолютна вологість — це густина ρ водяної пари за даної температури [5].

Одиниця абсолютної вологості в системі SI — кілограм на метр у кубі (кг/м$^3$) [13].

Оскільки ж маса водяної пари в 1 м$^3$ невелика, то часто для вимірювання абсолютної вологості використовують позасистемну одиницю – грам на сантиметр у кубі (г/см$^3$) [5].

$$1г/см3 = 0,001кг/м3. \quad (3.1)$$

Отже, якщо за температури 16 °С водяна пара становить 4г/м3 , то це означає, що за даної температури кожний кубічний метр повітря містить 4г водяної пари [5].

На підставі величини абсолютної вологості повітря не можна скласти об'єктивної картини про ступінь вологості повітря, бо за однакової маси водяної

пари, але більшої температури, повітря буде більш сухим, а за меншої температури — більш вологим [5].

Поняття відносної вологості повітря вводиться для того, щоб визначити рівень вологості повітря, а саме наскільки водяна пара близька до насичення.

Відносна вологість — це відношення абсолютної вологості повітря за деякої температури до густини насиченої водяної пари за тієї ж температури [5].

Даний параметр вимірюється у відсотках.

Для обчислення відносної вологості повітря необхідно:

а) виміряти температуру повітря і за таблицею (див. додаток А, рис.А.1) знайти тиск насиченої пари, який відповідає даній температурі;

б) визначити точку роси і за таблицею (див. додаток А, рис.А.1) знайти тиск водяних парів, що відповідає цій же температурі;

в) обчислити відносну вологість повітря за формулою (3.2) або (3.3) [5].

Відносна вологість описується наступною формулою:

$$\varphi = \rho/\rho_н \cdot 100\%, \qquad (3.2)$$

де $\varphi$ – відносна вологість повітря; $\rho$ – густина водяної пари за деякої температури; $\rho_н$ – густина насиченої водяної пари за тієї ж температури, що й $\rho$.

Також відносну вологість повітря можна прирівняти до відношення тиску водяної пари за деякої температури до тиску насиченої водяної пари за цієї ж самої температури. Це співвідношення ми можемо побачити в наступній формулі:

$$\varphi = p/p_н \cdot 100\%, \qquad (3.3)$$

де $p$ – тиск водяної пари за деякої температури; $p_н$ – тиск насиченої водяної пари за тієї ж температури, що й $p$.

Відносна вологість повітря залежить не тільки від абсолютної вологості, а й від температури. Якщо кількість водяної пари у повітрі не змінюється, то зі зниженням температури відносна вологість зростає, оскільки чим нижча температура, тим ближче водяна пара до насичення. Для обчислення відносної вологості користуються відповідними таблицями, де подано значення $\rho_н$ або $p_н$ [5].

АКІТ 2024

Давайте розглянемо простий приклад. Нехай абсолютна вологість повітря за 28 °С дорівнює 13,6г/м3. Оскільки густина насиченої водяної пари $\rho_н$ за цієї температури дорівнює 27,2г/м3 (див. додаток А, рис.А.1) [5].

Для того, щоб вирахувати відносну вологість, використаємо формулу (3.2):

$$\varphi = 13,6/27,2 \cdot 100\% = 50\%.$$

Припустимо, що температура повітря знизилась до 16 °С, а абсолютна вологість не змінилась. За цієї температури відносна вологість повітря буде дорівнювати:

$$\varphi = 13,6/13,6 \cdot 100\% = 100\%,$$

тобто повітря буде насиченим водяною парою. 100% значення відносної вологості називають точкою роси, тобто коли повітря є насиченим водяною парою [5].

Якщо ж температура знизиться до 10°С, то густина насиченої водяної пари $\rho_н$ буде дорівнювати 9,4г/м$^3$ (див. додаток А, рис.А.1), а абсолютна вологість залишатиметься незмінною, то з кожного кубічного метра повітря сконденсується по 4,2г водяної пари, тому що:

$$13,6 - 9,4 = 4,2г.$$

В розглянутому вище прикладі точка роси дорівнює 16°С. Якщо температура повітря стане хоча б трохи нижчою за точку роси, пара почне конденсуватися, з'являться туман і краплі роси на різних предметах [5].

Таким чином, знижуючи температуру, можна довести відносну вологість повітря до 100 %, не змінюючи кількість пари, яка є в ньому [5].

### 3.2 Методи вимірювання вологості ґрунту

#### 3.2.1 Гравіметричний метод

Гравіметричні методи вимірювання вологості ґрунту базуються на вилученні води зі зразка шляхом випаровування, вимивання або хімічної реакції. Кількість вилученої зі зразка води вимірюється і на цій основі вираховується вологість ґрунту. Вимірювання кількості вилученої води відбувається кількома методами. Найпростіший метод — вимірювання зменшення ваги зразка.

Вимірювання кількості вилученої води також може проводитися шляхом дистиляції або вбирання осушувачем. Врешті, вміст води в зразку може бути визначений кількісним вимірюванням продуктів реакції, вилучених зі зразка. За кожного з цих методів відбувається розділення ґрунту й води з вимірюванням або оцінкою обсягу вилученої води [6].

Існує багато різних типів приладів для гравіметричного вимірювання вмісту води в ґрунті, тож якихось спеціальних вимог до них немає. Для вимірювання вологості ґрунту за допомогою сушильної шафи потрібні контейнери зі щільно прилягаючими кришками, шафи, де можна контролювати температуру та ваги. Сушильна шафа може бути конвективна або з примусовою вентиляцією. Найточніші дані дає вакуумна сушильна шафа (див. рис.3.1). Ваги можуть застосовуватися від аналітичних до великих платформних залежно від величини зразка і потрібної точності вимірювання [6].

Рисунок 3.1 – Сушильна шафа [6]

Вимірювання вологості ґрунту в сушильній шафі вважається стандартом точності. А от визначення вологості поверхневого шару ґрунту ускладнене через знижену чутливість. Набір обладнання дуже простий: пробовідбірник, ваги і сушильна шафа. Водночас вимірювання вологості цим методом марудне і забирає багато часу: зразок висушується приблизно добу. А виміряти вологість замерзлого ґрунту цим методом важко. Зате вологість ґрунту легко вирахувати за масою. Відбирати ґрунту для аналізу на вологість цим методом можна в будь-якому місці. Визначення вологості ґрунту гетерогенного профілю ускладнене, як

і визначення вологості на певній глибині. Забір зразків недорогий порівняно з іншими методами [6].

### 3.2.2 Метод нейтронного розсіювання

Середнє значення втрати енергії або термалізація нейтронів значно вищі, коли нейтрони стикаються з атомами з низькою атомною вагою, ніж коли з важчими атомами. В ґрунті атоми з малою вагою представлені переважно воднем. В результаті водень уповільнює швидкі нейтрони значно ефективніше, ніж будь-який інший елемент у ґрунті. Оскільки найбільшим джерелом атомів водню в ґрунті є вода, існує зв'язок між вологістю і термалізацією нейтронів [6].

Природа нейтронного розсіяння і процесу термалізації накладають суттєві обмеження на точність вимірювання вологості. Об'єм ґрунтового зразка залежить від концентрації розсіяних ядер, тобто, насамперед від вмісту води, а також від енергії швидких нейтронів [6].

При використанні деяких серійних моделей інструментів можна виміряти вологість із точністю більше, ніж 0,1%. Водночас вимірювання вологості залежить від багатьох фізичних і хімічних властивостей ґрунту, які складно виміряти. Метод не дозволяє точно виміряти вологість на або біля поверхні ґрунту [6].

Прилади компактні і прості у використанні. Вологість може бути виміряна незалежно від фізичного стану ґрунту. Прилади можуть бути інтегровані з базою даних, що дає змогу автоматичного збору і запису показників. Завдяки цій методиці легко виявити швидкі зміни вологості ґрунту. Дані про вологість ґрунту прилади видають порівняно швидко — протягом 1–5 хв [6].

Вимірювання можна повторити на тому самому місці. Налаштування відповідно до місцевих особливостей ґрунту може бути складним. Також складно виміряти абсолютні показники вологості. Та одним з найбільших недоліків є висока вартість обладнання [6].

### 3.2.3 Тензіометричний метод

Найвідоміший метод вимірювання капілярної або загальної вологоємності ґрунту базується на здатності останнього вбирати воду. Прилади, що

використовують цей метод, здатні фіксувати зміни вологоємності ґрунту, що є наслідком інфільтрації води, поливу, підйому ґрунтових вод, випаровування та транспірації. Нуль на шкалі тензіометра означає, що ґрунт повністю насичений вологою. Водночас максимальний показник тензіометра — 1 бар. Таким чином, діапазон вологості ґрунту, в якому тенізометр може працювати, обмежений. І на ґрунтах високої потенційної вологоємності у дуже сухих умовах тензіометри зашкалювали і ламалися [6].

Тензіометр напряму вимірює водовбирну здатність ґрунту, але лише непрямо — власне вологість ґрунту. Щоб розуміти зв'язок між вологоємністю і вологістю, необхідно знати водні характеристики ґрунту [6].

Рисунок 3.2 – Тензіометр [6]

Прямі виміри на поверхні ґрунту неможливі. Систему приладів легко сформувати, і вона довго служить, якщо правильно налаштована. За температур близько і нижче нуля можна використовувати інші рідини, наприклад, етиленгліколь. Вологість мерзлого ґрунту система не вимірює [6].

Інформацію про насиченість ґрунту вологою можна отримувати майже в режимі реального часу. Реакція системи на зміни характеристик ґрунту дуже швидка. Прилади легко розміщуються в ґрунті [6].

При калібруванні приладів необхідно розуміти водовбирну здатність різних типів ґрунтів. Вартість системи приладів порівняно низька [6].

### 3.2.4 Ємнісний метод

Ємність визначає діелектричну проникність шляхом вимірювання часу заряду конденсатора, який використовує ґрунт як діелектричне середовище. Час заряду конденсатора є лінійною функцією діелектричної проникності ґрунту. Ємнісні датчики вимірюють діелектричну проникність ґрунту, щоб визначити його вологість. Оскільки діелектрична проникність води набагато вища, ніж у повітря або мінералів ґрунту, діелектрична проникність ґрунту є чутливим показником вмісту води.

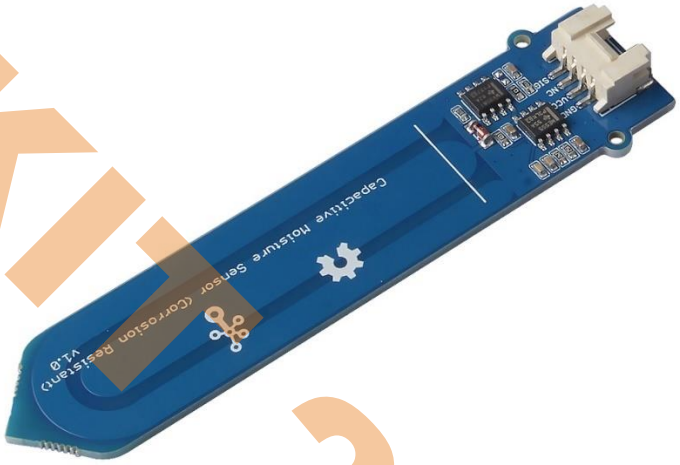


Рисунок 3.3 – Ємнісний датчик вологості ґрунту [7]

Датчик подає напругу і створює ланцюг (потік електричного струму). Цей струм буде коливатися або вібрувати на частоті, яка залежить від кількості води в ґрунті. Коли ви додаєте воду в ґрунт, його здатність утримувати заряд (ємність) змінюється, що потім змінює вібрацію (резонансну частоту) контуру.

Датчик вимірює цю зміну (резонансну частоту) і використовує її для визначення вологості ґрунту.

Через різницю в діелектричній проникності води і повітря та дуже малу кількість ґрунту, яку оцінює датчик, будь-який повітряний прошарок навколо датчика спричиняє похибки. Датчики ємності повинні мати відмінний контакт з вимірюваним середовищем без повітряних проміжків.

АКІТ 2024

Обсяг вимірювання залежить від розміру датчика: більшість датчиків мають довжину від 5см до 10см, але саме частина датчика, що вимірює вологість ґрунту має довжину 3см. Поле впливу є найбільшим на межі контакту датчика з субстратом і швидко зменшується від неї. Як правило, поле впливу знаходиться на відстані приблизно 1 см від датчика. Враховуючи, що датчик довжиною 3см заглиблений у ґрунт на 1 см, необхідно дотримуватися особливої обережності при монтажі, щоб не допустити повітряних проміжків.

Перевагою ємнісних датчиків є відносно низька вартість електронних компонентів. Тому вони є найбільш поширеними повністю електронними датчиками ґрунтової води для некритичних вимірювань вологості.

АКІТ 2024

# 4 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ

Давайте розглянемо та проаналізуємо на стійкість систему автоматичного регулювання (САР) вологості ґрунту, що складається з наступних ланок:

- об'єкт керування – ґрунт, описується аперіодичною ланкою першого порядку : $600\frac{dW(t)}{\mathrm{dt}} + W(t) = 0.55\,c(t)$;

- датчик – описується аперіодичною ланкою першого порядку: $0.35\frac{du(t)}{\mathrm{dt}} + u(t) = 4.5W(t)$;

- регулятор: $\mathrm{I(t)} = 0.6\,\mathrm{u(t)}$;

- виконавчий елемент – оприскувач (зволожувач), описується аперіодичною ланкою першого порядку : $0.7\frac{dc(t)}{\mathrm{dt}} + c(t) = 0.85\,I(t)$ [7., с. 25].

## 4.1 Розробка функціональної схеми САР

Технічне завдання передбачає включення до функціональної схеми САР вологості ґрунту (див. рис. 4.1) наступних блоків:

а) ЧЕ – чутливий елемент;

б) КЕ – керуючий елемент;

в) ВЕ – виконавчий елемент

г) ОК – об'єкт керування;

д) ЕП – елемент порівняння

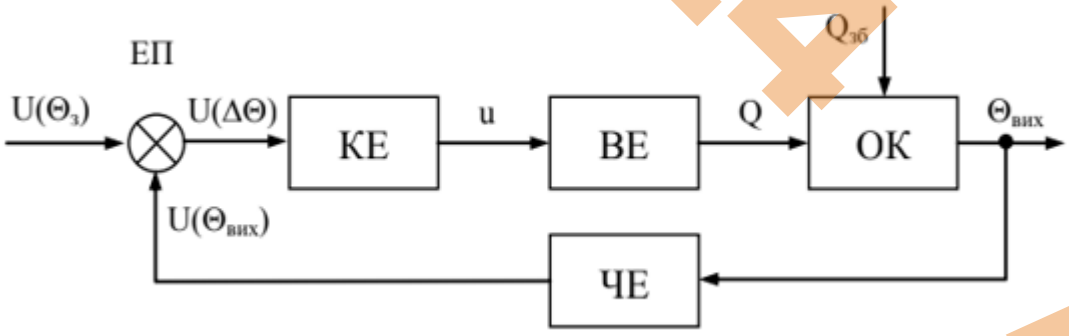


Рисунок 4.1 – Функціональна схема САР вологості ґрунту

Відомо, що U(Θз) – вхідний сигнал, який пропорційний заданій вологості; Θвих – реальна вологість ґрунту; Q – подача вологоносія, що впливає на вологість

ґрунту; Qзб – збурюючий вплив; U(Θвих) – вихідний сигнал датчика вологості; u – вихідний сигнал регулятора.

САР працює наступним чином:

- під дією збурюючого впливу Qзб змінюється значення вологості ґрунту Θвих, що сприймається чутливим елементом, який формує пропорційний вихідний сигнал U(Θвих);

- на виході елементу порівняння формується різниця U(ΔΘ) між заданим U(Θз) та реальним значенням вологості, яка подається на керуючий елемент;

- керуючий елемент своїм вихідним сигналом u змінює режим роботи виконавчого елементу, який збільшує або зменшує подачу вологоносія Q до об’єкту керування, тобто до ґрунту, і таким чином компенсує дію збурюючого впливу.

Оскільки вхідним сигналом для регулятора є різниця ΔΘ між заданим значенням вологості та реальною вологістю, розроблений регулятор працює за принципом відхилення (принцип Ползунова-Уатта).

**4.2 Визначення передатних функцій ланок, що входять до складу САР**

Розглянемо перехід від диференціального рівняння до передатної функції на прикладі об'єкту керування. Диференціальне рівняння об’єкту керування:

$$600\frac{dW(t)}{\mathrm{dt}} + W(t) = 0.55\,c(t)$$

Далі потрібно перейти від диференціального рівняння до алгебраїчного, це можна зробити, замінивши похідні на оператор Лапласа s:

$$(600\mathrm{s} + 1)\,\mathrm{W(s)} = 0.55\,\mathrm{c(t)}$$

Передатна функція об’єкту керування (ОК) $W_{ок}$ визначається в операторній формі.

$$\mathrm{W_{ок}\,(s)} = \frac{0.55}{600s + 1}$$

Аналогічно визначимо передатні функції для інших ланок САР:

- ПФ чутливого елементу (ЧЕ):

$$0.35s\ +\ 1 = 4.5W(s)$$

$$W_{че}(s) = \frac{4.5}{0.35s + 1}$$

- ПФ керуючого елементу (КЕ):

$$1 = 0.6\,u(t)$$

$$W_{ке}(s) = \frac{0.6}{1} = 0.6$$

- ПФ виконуючого елементу (ВЕ):

$$0.7s\ + 1 = 0.85\,I(t)$$

$$W_{ве}(s) = \frac{0.85}{0.7s + 1}$$

### 4.3 Розробка структурної схеми САР

Опираючись на технічне завдання та визначені передатні функції, розробляємо структурну схему САР вологості ґрунту (див.рис. 4.2), яка вміщує в собі наступні аперіодичні ланки першого порядку:

а) датчик – вологомір, описується значенням: $\frac{4.5}{0.35s+1}$;

б) регулятор – мікроконтролер, описується значенням: 0.6;

в) виконавчий елемент – водяний насос, описується значенням: $\frac{0.85}{0.7s+1}$;

г) об'єкт керування – ґрунт, описується значенням: $\frac{0.55}{600s+1}$.

З аналізу САР можна встановити, що при підвищенні вологості ґрунту регулятор повинен зменшити подачу вологоносія, тобто понизити вологість об'єкту керування, і навпаки. Таким чином робимо висновок, що для САР необхідно використати негативний зворотний зв'язок (НЗЗ), що позначено на структурній схемі затемненим сектором елементу порівняння.

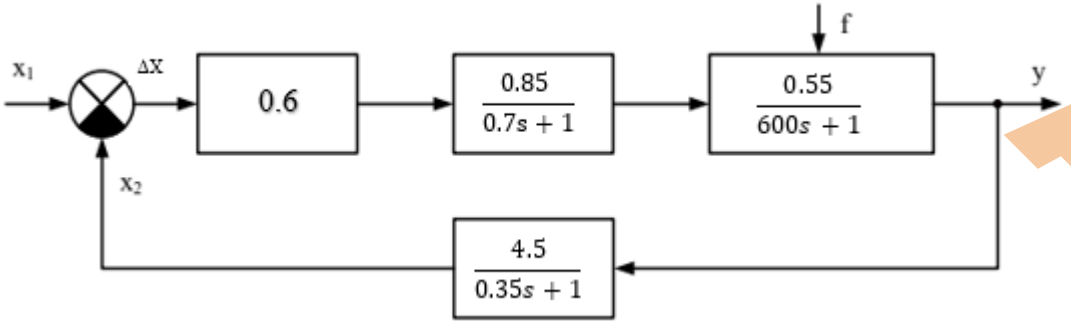


Рисунок 4.2 – Структурна схема САР вологості ґрунту

### 4.4 Знаходження передатних функцій та складання характеристичного рівняння САР

Щоб проаналізувати САР на стійкість, необхідно знайти передатну функцію системи. Спочатку знайдемо передатну функцію розімкненої системи (з розімкненим зворотнім зв'язком) – $W_{роз}(s)$:

$$W_{роз}(s) = W_{ке} \cdot W_{ве} \cdot W_{ок} \cdot W_{че} \quad (4.1)$$

$$W_{роз}(s) = 0.6 \cdot \frac{0.85}{0.7s+1} \cdot \frac{0.55}{600s+1} \cdot \frac{4.5}{0.35s+1} = \frac{1.26}{147s^3 + 630.25s^2 + 601.05s + 1} \quad (4.2)$$

Далі знайдемо передатну функцію (ПФ) прямого сигналу $W_{пр}$:

$$W_{пр}(s) = W_{ке} \cdot W_{ве} \cdot W_{ок} \quad (4.3)$$

$$W_{пр}(s) = 0.6 \cdot \frac{0.85}{0.7s+1} \cdot \frac{0.55}{600s+1} = \frac{0.28}{420s^2 + 600.7s + 1}$$

Наступним знаходимо ПФ замкненої САР $W_{замк}(s)$:

$$W_{замк}(s) = \frac{W_{пр}}{1 + W_{роз}} \quad (4.4)$$

$$W_{замк}(s) = \frac{0.6 \cdot \frac{0.85}{0.7s+1} \cdot \frac{0.55}{600s+1}}{1 + \frac{1.26}{147s^3 + 630.25s^2 + 601.05s + 1}} =$$

$$= \frac{\frac{0.28}{420s^2 + 600.7s + 1}}{1 + \frac{1.26}{147s^3 + 630.25s^2 + 601.05s + 1}}$$

$$= \frac{\frac{0.28}{420s^2 + 600.7s + 1}}{\frac{147s^3 + 630.25s^2 + 601.05s + 2.26}{147s^3 + 630.25s^2 + 601.05s + 1}} =$$

АКІТ 20.24

$$= \frac{0.28}{420s^2 + 600.7s + 1} \cdot \frac{147s^3 + 630.25s^2 + 601.05s + 1}{147s^3 + 630.25s^2 + 601.05s + 2.26} =$$

$$= \frac{41.16s^3 + 176.5s^2 + 168.3s + 0.28}{61740s^5 + 353000s^4 + 631200s^3 + 362600s^2 + 1959s + 2.26} \quad (4.5)$$

Потім знаходимо ПФ дії збурення $W_{зб}(s)$:

$$W_{зб}(s) = \frac{W_{ок}}{1 + W_{роз}} \quad (4.6)$$

$$W_{зб}(s) = \frac{\frac{0.55}{600s + 1}}{1 + \frac{1.26}{147s^3 + 630.25s^2 + 601.05s + 1}} =$$

$$= \frac{\frac{0.55}{600s + 1}}{\frac{147s^3 + 630.25s^2 + 601.05s + 2.26}{147s^3 + 630.25s^2 + 601.05s + 1}} =$$

$$= \frac{80.85s^3 + 346.6s^2 + 330.6s + 0.55}{88200s^4 + 378297s^3 + 361300s^2 + 1957s + 2.26}$$

Далі знаходимо ПФ за помилкою САР $W_{\Delta x,x}(s)$:

$$W_{\Delta x,x}(s) = \frac{1}{1 + W_{роз}} \quad (4.7)$$

$$W_{\Delta x,x}(s) = \frac{1}{1 + \frac{1.26}{147s^3 + 630.25s^2 + 601.05s + 1}1} =$$

$$= \frac{1}{\frac{147s^3 + 630.25s^2 + 601.05s + 2.26}{147s^3 + 630.25s^2 + 601.05s + 1}} =$$

$$= \frac{147s^3 + 630.25s^2 + 601.05s + 1}{147s^3 + 630.25s^2 + 601.05s + 2.26}$$

І останнім знаходимо ПФ помилки за збуренням $W_{\Delta x,f}(s)$:

$$W_{\Delta x,f}(s) = \frac{W_{ок} \cdot W_{че}}{1 + W_{роз}} \quad (4.8)$$

АКІТ 2024

$$W_{\Delta x,f}(s) = \frac{\frac{0.55}{600s+1} \cdot \frac{4.5}{0.35s+1}}{1 + \frac{1.26}{147s^3 + 630.25s^2 + 601.05s + 1}} =$$

$$= \frac{\frac{2.48}{210s^2 + 600.4s + 1}}{\frac{147s^3 + 630.25s^2 + 601.05s + 2.26}{147s^3 + 630.25s^2 + 601.05s + 1}} =$$

$$= \frac{363.8s^3 + 1560s^2 + 1488s + 2.48}{30870s^5 + 220600s^4 + 504700s^3 + 361900s^2 + 1958s + 2.26}$$

Далі за результатами даних обчислень проаналізуємо САР на критерії стійкості.

### 4.5 Аналіз стійкості САР

#### 4.5.1 Аналіз стійкості САР за критерієм Гурвіца

Критерій Гурвіца базується на певному записі коефіцієнтів характеристичного рівняння (4.9) (воно береться зі знаменника дробу (4.5)), у вигляді визначників і формулює умови стійкості в залежності від знаків коефіцієнтів та визначників.

$$61740s^5 + 353000s^4 + 631200s^3 + 362600s^2 + 1959s + 2.26 \qquad (4.9)$$

Визначник Гурвіца складають таким чином: усі коефіцієнти від $a_1$ до $a_n$ розташовують за головною діагоналлю в порядку зростання індексів; вгору від головної діагоналі, в стовпцях, записуються коефіцієнти характеристичного рівняння з послідовно зростаючими, а вниз – з убутними індексами; на місці коефіцієнтів, індекси яких більші ніж n і менші ніж нуль, проставляють нулі. У нашому випадку формула визначника буде виглядати так:

$$\Delta_5 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & a_3 & a_5 \end{vmatrix} \qquad (4.10)$$

Підставляючи коефіцієнти характеристичного рівняння (4.9) у визначник Гурвіца (4.10), одержимо матрицю розміром 5x5:

$$\Delta_5 = \begin{vmatrix} 61740 & 631200 & 1959 & 0 & 0 \\ 0 & 353000 & 362600 & 2.26 & 0 \\ 0 & 61740 & 631200 & 1959 & 0 \\ 0 & 0 & 353000 & 362600 & 2.26 \end{vmatrix}$$

У нашому прикладі $a_0>0$; $a_1>0$; $a_2>0$; $a_3>0$; $a_4>0$; $a_5>0$.

Виконаємо обчислення мінорів $\Delta_1$ - $\Delta_5$ за формулами:

$$\Delta_1 = a_1 \quad (4.11)$$

$$\Delta_2 = a_1a_2 - a_0a_3 \quad (4.12)$$

$$\Delta_3 = a_3 \cdot \Delta_2 \quad (4.13)$$

$$\Delta_4 = a_4 \cdot \Delta_3 \quad (4.14)$$

$$\Delta_5 = a_5 \cdot \Delta_4 \quad (4.15)$$

$\Delta_1 = 353000$

$\Delta_2 = (353000 \cdot 631200) – (61740 \cdot 362600) = 200426676000$

$\Delta_3 = 362600 \cdot 200426676000 = 7.267 \cdot 10^{16}$

$\Delta_4 = 1959 \cdot 7.267 \cdot 10^{16} = 1.424 \cdot 10^{20}$

$\Delta_5 = 2.26 \cdot 1.424 \cdot 10^{20} = 3.218 \cdot 10^{20}$

### 4.5.2 Аналіз стійкості САР за критерієм Михайлова

Аналіз стійкості САР проводиться за допомогою характеристичного рівняння замкненої системи (4.9). Для цього замінимо комплексну змінну s на jω і отримаємо вектор Михайлова:

$$61740(j\omega)^5 + 353000(j\omega)^4 + 631200(j\omega)^3 + 362600(j\omega)^2 + 1959(j\omega) + \\ +2.26 = 0$$

Виділимо в рівнянні дійсну $P(\omega)$ та уявну $Q(\omega)$ частину, враховуючи що:

$$j = \sqrt{-1}\ ;\ j^2 = -1\ ;\ j^3 = -j\ ;\ j^4 = 1\ ;\ j^5 = j.$$

$$P(\omega) = 353000\omega^4 – 362600\omega^2 + 2.26 \quad (4.16)$$

$$Q(\omega) = 61740\omega^5 – 631200\omega^3 + 1959\omega \quad (4.17)$$

Побудувавши годограф Михайлова (див.рис.4.3), ми бачимо як він переходить з першого у другий квадрант, далі показано вхідний код до цього годографа у програмі MATLAB 2022 (див.рис.4.4), якою ми і будем користуватись для побудови годографів і кривих, а також задавати їх вхідні дані.

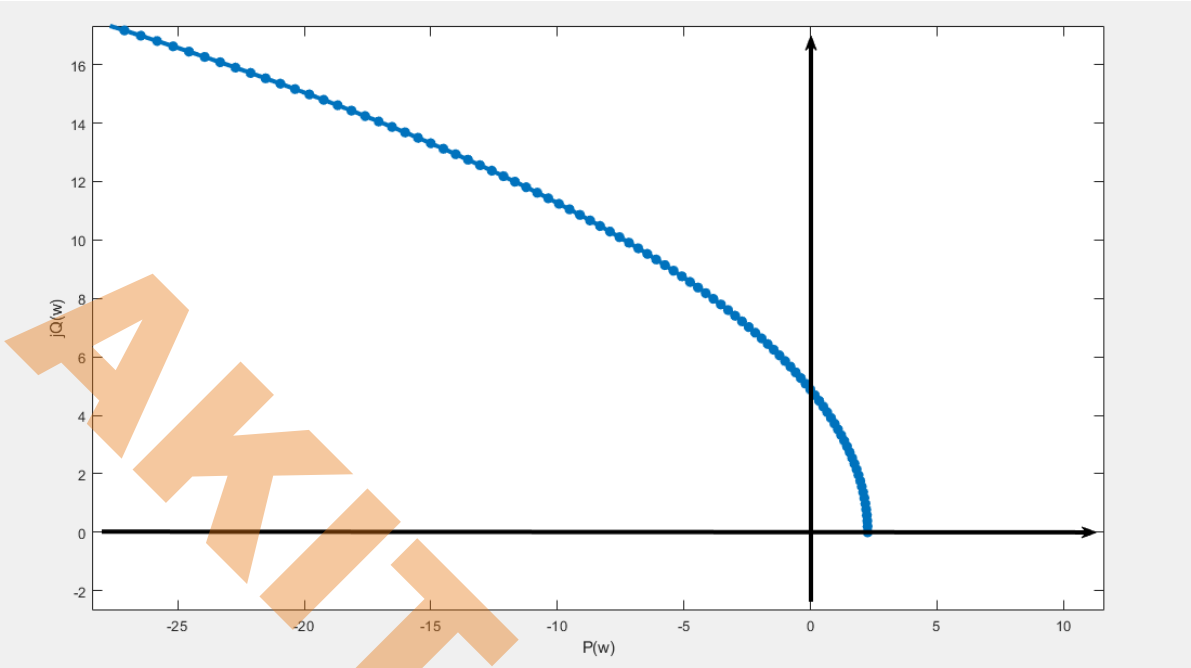


Рисунок 4.3 – Годограф Михайлова (1,2 квадрант)

```
Command Window
>> w = 0:0.0001:0.01;
>> p = 353000*w.^4 - 362600*w.^2 + 2.26;
>> q = 61740*w.^5 - 631200*w.^3 + 1959*w;
>> plot (p,q)
fx >>
```

Рисунок 4.4 – Код програми для побудови годографа Михайлова

Щоб показати як крива буде преходити далі до п’ятого квадранта (тому що найвища степінь у характеристичному рівнянні (4.9) п’ята), потрібно буде змінювати лише значення частоти $\omega$, а саме її крок та кінцеве значення, тобто $\omega = 0 : n$ (крок) : $n$ (кінцеве значення). Важливо, що значення $\omega$ для цього критерію може бути від 0 до $+\infty$. Далі вводимо команду «plot» зі значеннями (4.16) та (4.17), щоб побудувати сам годограф (див.рис.4.4).

Невеликі опуклості на кривих – це точки, по яким будується крива.

АКІТ 2024

Годограф Михайлова в зменшеному масштабі, де показано як він перетинає 1,2 та 3 квадрант показано на рис.4.5 та відповідний код програми на рис.4.6.

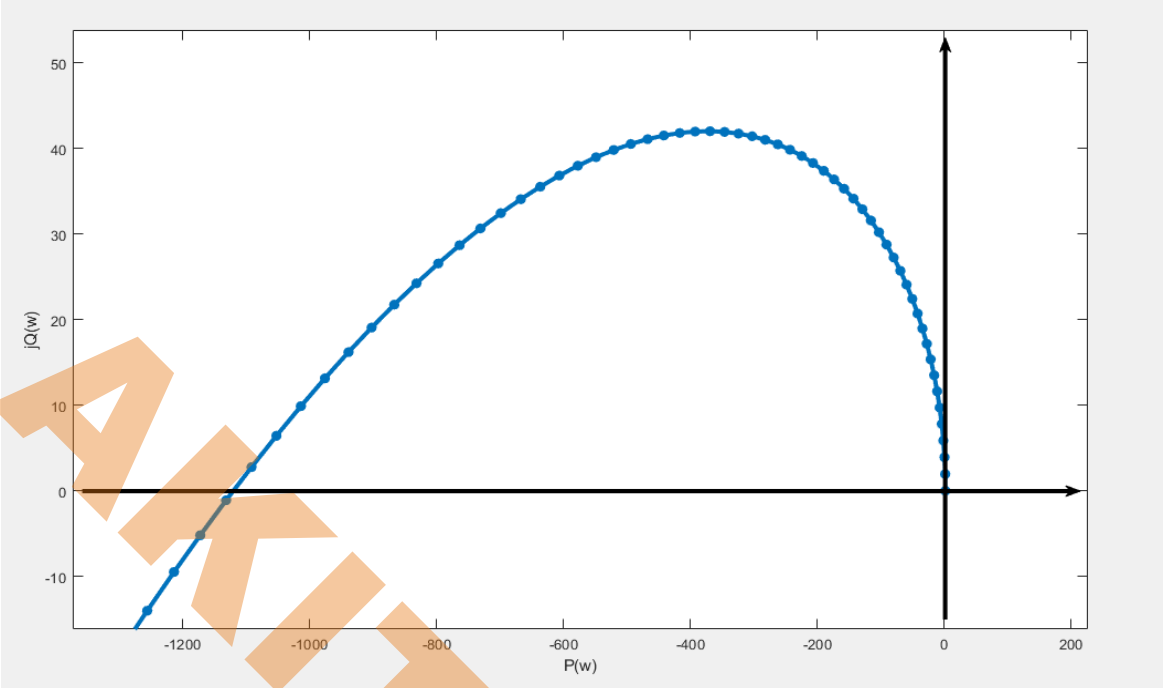


Рисунок 4.5 – Годограф Михайлова (1,2,3 квадрант)

```
Command Window
>> w = 0:0.001:0.06;
>> p = 353000*w.^4 - 362600*w.^2 + 2.26;
>> q = 61740*w.^5 - 631200*w.^3 + 1959*w;
>> plot (p,q)
fx >>
```

Рисунок 4.6 – Код програми для побудови годографа Михайлова

Варто відмітити те, що зі збільшенням кінцевого значення в $\omega$, крива останнього годографа дедалі більше закручується, і вже переходить у третій квадрант. Також видно, що масштаб на координатних осях значно збільшився, порівняно з першим годографом (див.рис.4.3). Така тенденція буде супроводжуватись аж до 5 квадранта.

Далі покажемо годограф ще в більш зменшеному масштабі, де він перетинає також і 4 квадрант (див.рис.4.7) та його вхідний код (див.рис.4.8).

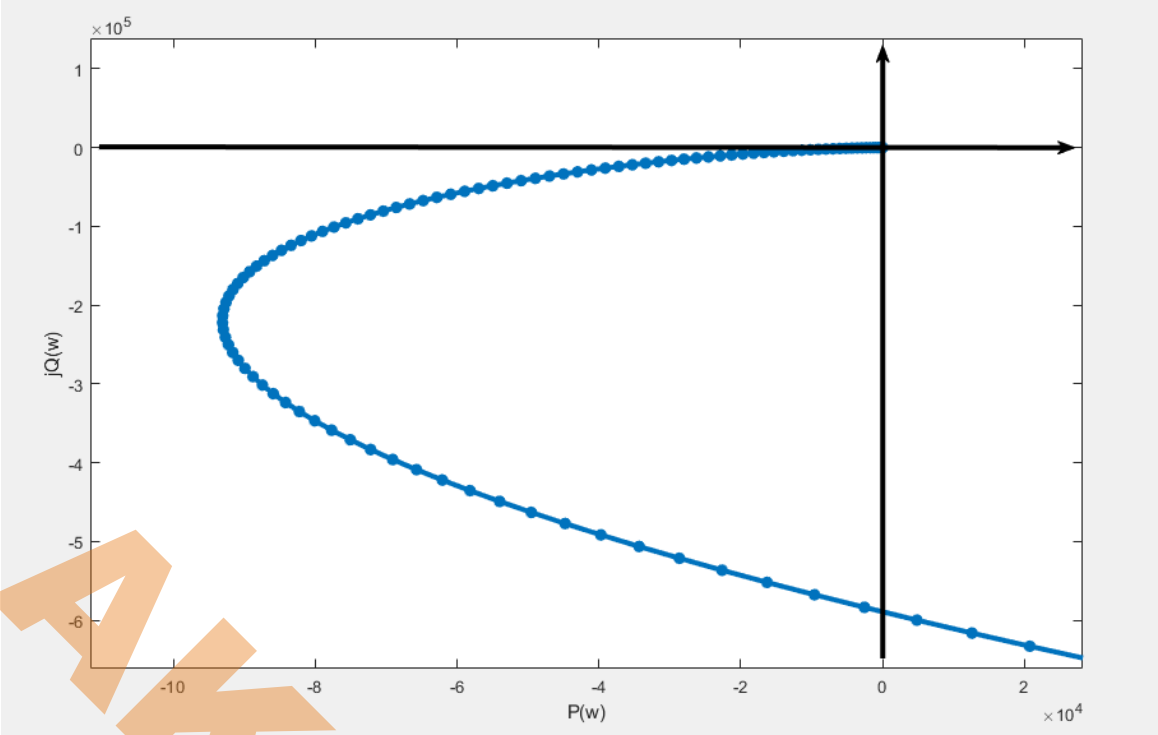


Рисунок 4.7 – Годограф Михайлова (4 квадранти)

```
Command Window
>> w = 0:0.01:1.05;
>> p = 353000*w.^4 - 362600*w.^2 + 2.26;
>> q = 61740*w.^5 - 631200*w.^3 + 1959*w;
>> plot (p,q)
fx >>
```

Рисунок 4.8 – Код програми для побудови годографа Михайлова

Можна також виділити, що вже майже не видно як крива годографа починається в першому квадранті та перетинає другий, це викликано дуже великим масштабом на координатних осях.

Далі показуємо годограф Михайлова в значно меншому масштабі, на якому видно як він послідовно перетинає також і 5 квадрант (див.рис.4.9) та його код програми (див.рис.4.10).

АКІТ 2024

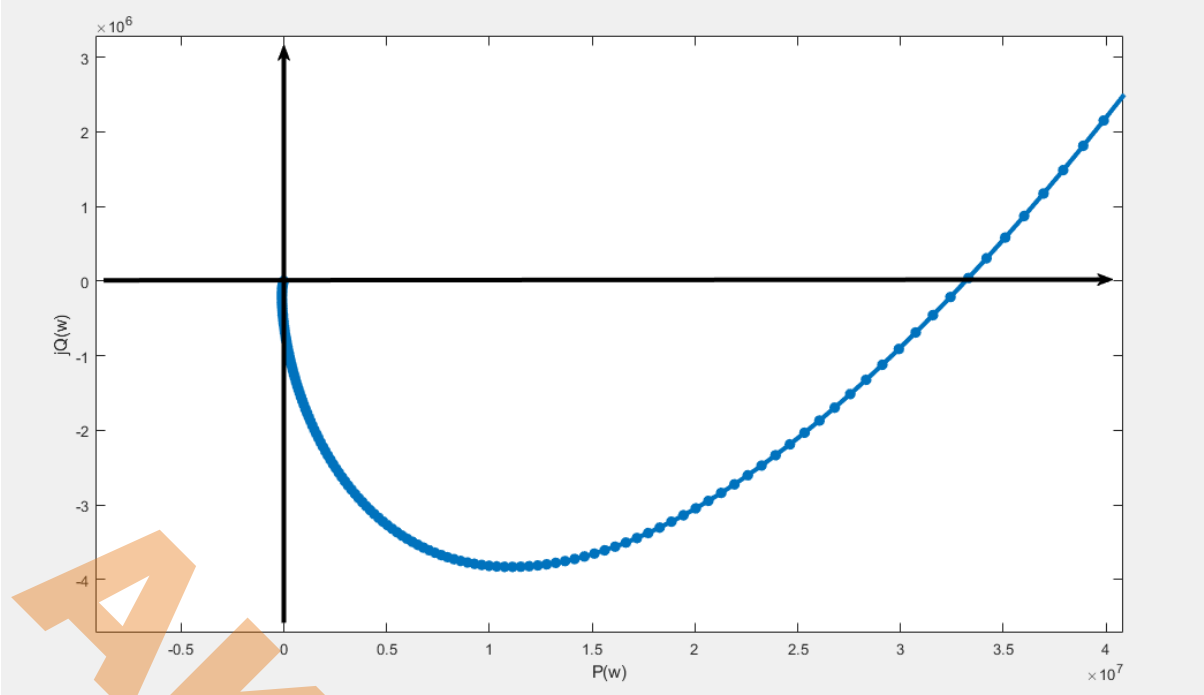


Рисунок 4.9 – Годограф Михайлова (усі 5 квадрантів)

```
Command Window
>> w = 0:0.02:3.4;
>> p = 353000*w.^4 - 362600*w.^2 + 2.26;
>> q = 61740*w.^5 - 631200*w.^3 + 1959*w;
>> plot (p,q)
fx >>
```

Рисунок 4.10 – Код програми для побудови годографа Михайлова

На зображенні останнього годографа показано кінцевий результат. Крива опинилася у п’ятому квадранті (п’ятий квадрант – це всеодно що перший, якщо йти по колу, а в нашому випадку проти годинникової стрілки). Подальше зменшення масштабу не приводить до перетинання шостого квадранту, що свідчить про те, що система є стійкою.

Висновок: з побудов видно, що годограф Михайлова починається на дійсній додатній півосі, обертається проти годинникової стрілки, ніде не перетворюється в нуль, проходить послідовно число квадрантів (п’ять), що дорівнює найвищій степені характеристичного рівняння (4.9), отже, система є стійкою.

АКІТ 2024

### 4.5.3 Аналіз стійкості САР за критерієм Найквіста

Критерій Найквіста дозволяє судити про стійкість замкненої системи за АФЧХ розімкненої системи, тобто потрібно буде використати вираз (4.2).

Для переходу від ПФ до амплітудно-фазо-частотної характеристики спочатку зробимо заміну $s$ на $j\omega$, при цьому враховуючи що:

$$j = \sqrt{-1}\ ;\ j^2 = -1\ ;\ j^3 = -j.$$

$$W_{роз}(j\omega) = \frac{1.26}{147(j\omega)^3 + 630.25(j\omega)^2 + 601.05j\omega + 1} =$$

$$= \frac{1.26}{-147j\omega^3 - 630.25\omega^2 + 601.05j\omega + 1} =$$

$$= \frac{1.26}{(-630.25\omega^2 + 1) + j(-147\omega^3 + 601.05\omega)} \quad (4.18)$$

Далі розділимо дріб на дійсну P(ω) та уявну Q(ω) частини. Для цього використаємо наступні формули:

$$W(j\omega) = \frac{a(\omega) + j \cdot b(\omega)}{c(\omega) + j \cdot d(\omega)} \quad (4.19)$$

Звідки слідує що:

$$W(j\omega) = P(\omega) + j \cdot Q(\omega) \quad (4.20)$$

$$P(\omega) = \frac{a(\omega) \cdot c(\omega) + b(\omega) \cdot d(\omega)}{c^2(\omega) + d^2(\omega)} \quad (4.21)$$

$$Q(\omega) = \frac{b(\omega) \cdot c(\omega) - a(\omega) \cdot d(\omega)}{c^2(\omega) + d^2(\omega)} \quad (4.22)$$

Враховуємо значення з дробу (4.18):

a (ω) = 1.26

b (ω) = 0

c (ω) = (-630.25ω^2+1)

d (ω) = (-147ω^3+601.05ω)

Виконавши всі обчислення за формулами (4.21) та (4.22), отримуємо наступні результати:

$$P(\omega) = \frac{-794.12\omega^2 + 1.26}{21609\omega^6 + 397215\omega^4 - 1260.5\omega^2 + 360060}$$

$$Q(\omega) = \frac{185.2\omega^3 - 757.3\omega}{21609\omega^6 + 397215\omega^4 - 1260.5\omega^2 + 360060}$$

Отже, з формули (4.20), дріб, розділений на дійсну та уявну частини буде виглядати так:

$$W(j\omega) = \frac{-794.12\omega^2 + 1.26}{21609\omega^6 + 397215\omega^4 - 1260.5\omega^2 + 360060} + j \cdot \frac{185.2\omega^3 - 757.3\omega}{21609\omega^6 + 397215\omega^4 - 1260.5\omega^2 + 360060}$$

Наступним етапом побудуємо годограф Найквіста. Його код програми зображений нижче:

```
Command Window
>> e = tf ([1.26], [147 630.25 601.05 1])

e =

          1.26
  -------------------------------
  147 s^3 + 630.2 s^2 + 601 s + 1

Continuous-time transfer function.

>> nyquist (e, [0:0.0001:35])
fx >>
```

Рисунок 4.11 – Код програми до годографа Найквіста

Можна помітити те, що на вхідних даних значення (e) рівне дробу (4.2). Це викликано тим, що в програмі MATLAB 2022 для годографа Найквіста не потрібно заміняти змінну *s* на *jω* та розділяти дріб розімкнутої САР на дійсну та уявну частину, тому що вона робить це автоматично.

Далі вводимо команду «nyquist», щоб побудувати годограф Найквіста, і задаємо наш вираз (позначений як «e») з межами від 0 до 35 з кроком 0.0001. Потім будуємо сам годограф (див.рис.4.12).

АКІТ 2024

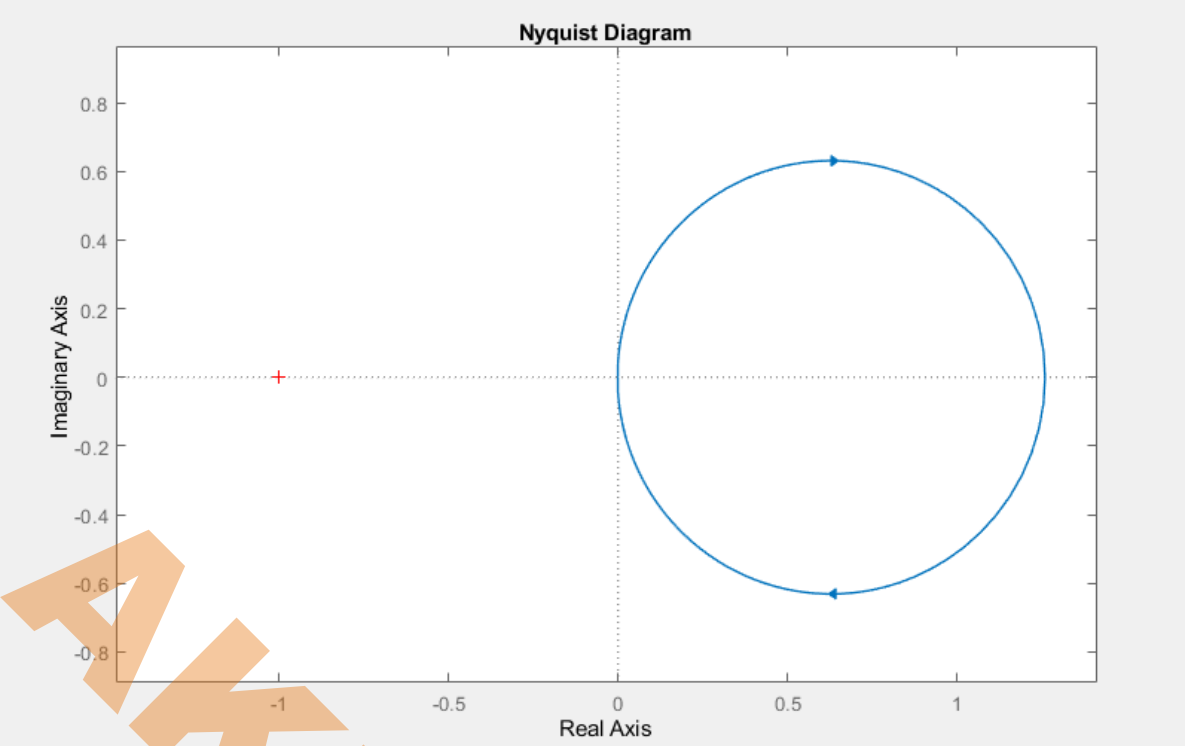


Рисунок 4.12 – Годограф Найквіста

З годографу Найквіста видно, що крива, яка замкнута в коло – не охоплює точку з координатами -1 ; j0 (вона позначена на рисунку маленьким хрестиком ліворуч). З цього слідує, що система є стійкою.

### 4.6 Визначення меж стійкості САР методом D-розбиття

Визначимо межі стійкості САР вологості ґрунту у випадку, коли варійований параметр μ – це загальний коефіцієнт підсилення системи у замкненому стані – k.

Як відомо, коефіцієнт підсилення системи автоматичного регулювання у замкненому стані чисельно дорівнює вільному члену характеристичного рівняння (4.9). Метод D-розбиття базується на критерії Михайлова і шуканий параметр μ визначається виразом:

$$\mu = -\frac{M(j\omega)}{N(j\omega)} \qquad (4.23)$$

Де $M(j\omega)$ – поліном складові якого не залежать від величини μ;

$N(j\omega)$ – поліном складові якого залежать від величини μ;

Таким чином, характеристичне рівняння (4.9) з заміною змінної $s$ на $j\omega$ та заміною вільного члена на значення μ виглядає наступним чином:

$$61740(j\omega)^5 + 353000(j\omega)^4 + 631200(j\omega)^3 + 362600(j\omega)^2 + 1959(j\omega) + \mu = 0$$

Якщо підставити значення згідно формули (3.33), вираз матиме такий вигляд:

$$\mu = -\frac{61740(j\omega)^5 + 353000(j\omega)^4 + 631200(j\omega)^3 + 362600(j\omega)^2 + 1959(j\omega)}{2.26} \quad (4.24)$$

Виділимо дійсну та уявну частини аналогічно до критерію Михайлова, але без вільного члену. Також в розділених частинах потрібно змінити знаки на протилежні, оскільки перед дробом (4.24) стоїть знак «мінус». Отже, дійсна та уявна частини будуть мати вигляд :

$$P(\omega) = -353000\omega^4 + 362600\omega^2 \quad (4.25)$$

$$Q(\omega) = -61740\omega^5 + 631200\omega^3 - 1959\omega \quad (4.26)$$

Таким чином, ввівши код програми (див.рис.4.13), зокрема це значення ω від -∞ до +∞, і розділені частини рівняння (4.25) та (4.26), разом із командою «plot» - отримуємо криву D-розбиття (див.рис.4.14), де замкнута область і є межами стійкості нашої САР.

```
Command Window
>> w = -0.1:0.0001:0.1;
>> p = -353000*w.^4 + 362600*w.^2;
>> q = -61740*w.^5 + 631200*w.^3 - 1959*w;
>> plot (p,q)
fx >>
```

Рисунок 4.13 – Код програми до методу D-розбиття

АКІТ 2024

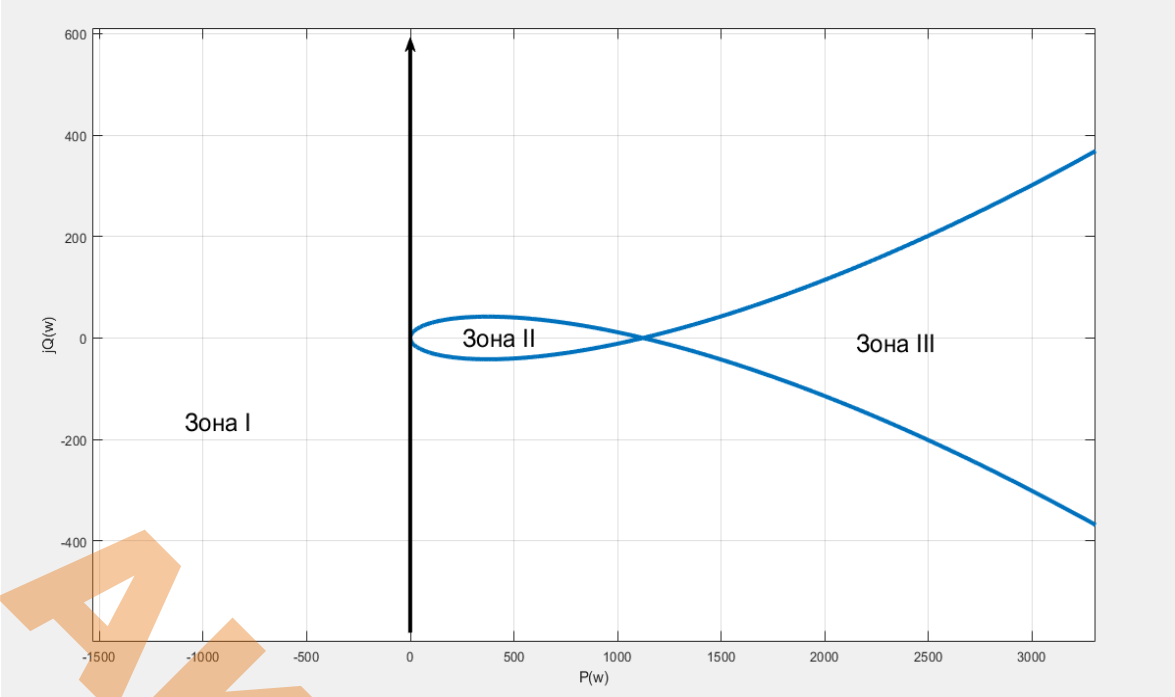


Рисунок 4.14 – Крива D-розбиття

Для визначення області, що відповідає шуканому параметру μ, на криву D-розбиття необхідно нанести штриховку за наступним правилом: при русі кривою у напрямку від значень частоти $\omega = -\infty$ до значень $\omega = +\infty$ область стійких систем знаходиться ліворуч, отже і штриховка наноситься зліва.

Як відомо, шуканий коефіцієнт підсилення замкненої системи може бути тільки дійсною додатною величиною, отже шукаємо на площині D-розбиття область, що відповідає наступним вимогам:

а) область має бути замкненою;

б) штриховка кривої у межах даної області має бути розташованою всередині;

в) область повинна лежати на додатній вісі дійсних чисел.

Далі можна збільшити масштаб області стійкості, щоб побачити більш точні координати:

АКІТ-2024

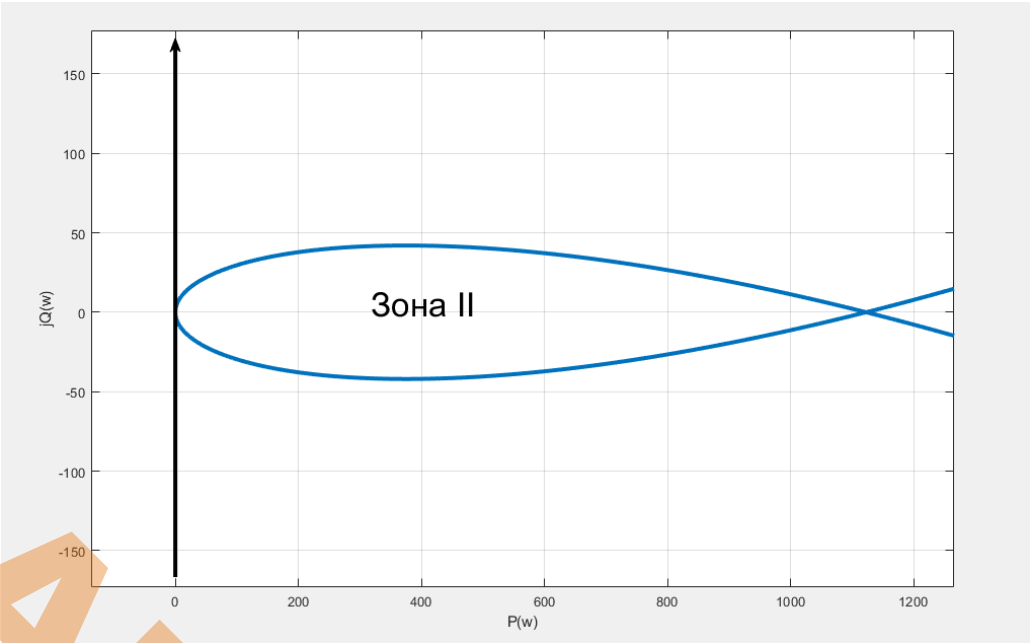


Рисунок 4.15 – Область кривої D-розбиття у збільшеному масштабі

Необхідно зазначити, що при виконанні розрахунків з використанням РС наносити штриховку на отриману криву необов'язково.

Висновок: за кривою D-розбиття можна визначити, що всім перерахованим вище вимогам відповідає тільки область II і відповідно значення коефіцієнту підсилення замкненої системи k, при якому вона буде стійкою знаходиться у межах від 0 до 1122.

АКІТ 2024

# 5 БЛОК КЕРУВАННЯ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ

## 5.1 Основні електронні компоненти, які використовуються в блоці керування вологості ґрунту

### 5.1.1 Ємнісний вологомір CSMS V2

Вологомір – це невеликий гігрометр, який вимірює кількість вологи в ґрунті. Вологоміри прості у використанні і зазвичай мають один або два металеві зонди, які вставляються в ґрунт для отримання показань.

Ємнісний датчик вологості ґрунту виявляє вологість через чутливий до вологи конденсатор. Він використовує спеціальний матеріал, який змінює діелектричну проникність, поглинаючи вологу в навколишньому середовищі, і значення ємності конденсатора змінюється. Датчик перетворює значення ємності в електричний сигнал і видає значення у відсотках для контролю вологості. Вибір на користь даного вологоміра був зроблений тому, що він є недорогим, простим в експлуатації, не вимагає складних схем підключень та забезпечує точні вимірювання.

Рисунок 5.1 – Ємнісний вологомір CSMS V2 [8]

Також цей модуль має вбудований стабілізатор напруги, що забезпечує діапазон робочої напруги 3,3 - 5,5 В. Він ідеально підходить для низьковольтних мікроконтролерів, як для 3,3 В, так і для 5 В.

Технічні характеристики та особливості:

- робоча напруга: 3,3 ~ 5,5 В постійного струму;
- робочий струм: 5 мА;
- точність вимірювання: 2% відносної вологості;
- інтерфейс: PH2.54-3P;
- підтримує 3-контактний інтерфейс датчика гравітації;
- аналоговий вихід.

### 5.1.2 Мікроконтролер Arduino Nano

Arduino Nano – це один з типів плат мікроконтролерів, розроблений компанією Arduino.cc. Вона може бути побудована на мікроконтролері типу Atmega328. Цей мікроконтролер також використовується в Arduino UNO. Це невелика за розміром плата, а також гнучка з широким спектром застосувань.

Цей пристрій має багато функцій і можливостей. Однак, ця Nano-плата відрізняється за комплектацією від багатьох інших. Вона не має роз'єму постійного струму, тому живлення можна подавати через невеликий USB-порт, який в іншому випадку підключається безпосередньо до таких контактів, як VCC і GND. На неї можна подавати живлення від 6 до 20 вольт через міні-порт USB.

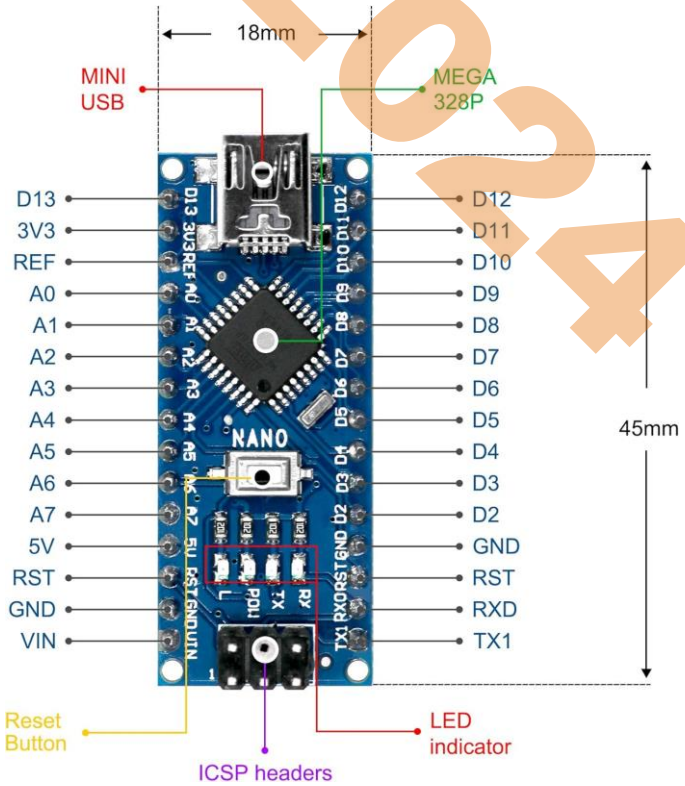


Рисунок 5.2 – Позначення розмірів, компонентів та пінів Arduino Nano [9]

Основні технічні характеристики мікроконтролера Arduino Nano наведено нижче:

- робоча напруга: 5В;
- вхідна напруга (рекомендована): 7-12В;
- цифрових входів/виходів: 14;
- аналогових входів: 8;
- сила струму на входах/виходах: 40 мА;
- сила струму для 3.3В виходу: 50 мА;
- пам'ять: 32 кБ з яких 2кб використовується бутлоадер;
- SRAM: 2 кБ;
- EEPROM: 1 кБ;
- частота: 16 МГц [11].

### 5.1.3 Електромеханічне реле MY2 AC220V

Реле – це простий електромеханічний перемикач. Хоча ми використовуємо звичайні вимикачі, щоб замикати або розмикати ланцюг вручну, реле – це також перемикач, який з'єднує або роз'єднує два ланцюги. Але замість ручного керування реле використовує електричний сигнал для керування електромагнітом, який, у свою чергу, з'єднує або роз'єднує інший ланцюг.

Реле функціонують за допомогою електромагнітної індукції. Для роботи реле котушка, що оточує його сердечник, живиться електроенергією від джерела живлення, яке ним керує. Коли реле знаходиться під напругою, воно створює магнітне поле, яке притягує контакт і замикає ланцюг всередині нього. Це вмикає або вимикає кероване навантаження.

Зовнішній вигляд електромеханічного реле показано на рисунку 5.3.

АКІТ 2024

Рисунок 5.3 – Електромеханічне реле MY2 AC220V [10]

Основні характеристики електромеханічного реле наведено нижче:

- напруга комутації: 250В;
- струм комутації: 5А;
- опір ізоляції не менше: 100МОм;
- потужність включення: 3,5…4Вт;
- потужність утримування: 1,5…2,5Вт;
- час ввімкнення: 25мс;
- час вимкнення: 15мс.

### 5.1.4 Стабілізатор напруги L7809CV

Стабілізатор напруги – це компонент блоку живлення, який забезпечує стабільну постійну напругу в будь-яких умовах експлуатації. Він регулює напругу при коливаннях напруги та зміні навантаження. Він може регулювати як змінну, так і постійну напругу.

Даний електронний компонент зазвичай приймає вищу вхідну напругу і видає нижчу, більш стабільну вихідну напругу. Їх вторинне використання також полягає в захисті схеми від стрибків напруги, які можуть пошкодити її.

Стабілізатори напруги поділяються на різні категорії залежно від їх застосування, механізму перетворення енергії та напруги, при якій вони працюють. Існує два основних типи стабілізаторів напруги: лінійні та імпульсні.

АКІТ2024

Лінійні регулятори – це переважно понижувальні перетворювачі, оскільки вони виробляють нижчу вихідну напругу порівняно з вхідною. Для цього в лінійних стабілізаторах використовується активний передавальний пристрій, керований операційним підсилювачем з високим коефіцієнтом підсилення.

Порівняно з іншими типами регуляторів, лінійні регулятори є економічно ефективними, простими в конструкції та надійними.

Імпульсні регулятори можуть бути понижувальними чи підвищувальними перетворювачами або їх комбінацією, тому вони більш універсальні, ніж лінійні регулятори.

Такі регулятори складніше спроектувати, ніж їхні лінійні аналоги. Вам також потрібно буде правильно налаштувати і вибрати правильні значення залежно від ваших компонентів для підвищення стабільності.

Деякі переваги імпульсних стабілізаторів включають підтримку ширшого діапазону вхідної та вихідної напруги, покращені теплові характеристики, вищий ККД до 95%, а також можливість підтримувати більший струм.

Для роботи імпульсних стабілізаторів потрібні додаткові компоненти. Деякі з цих компонентів включають конденсатори, котушки індуктивності та FET-транзистори.

Також варто додати, що у блоці керування вологості ґрунту буде використовуватись саме лінійний стабілізатор напруги (див.рис. 5.4).

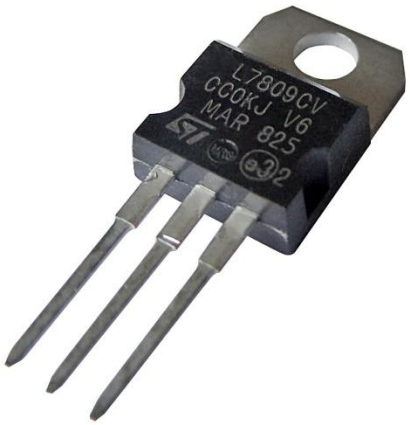


Рисунок 5.4 – Лінійний регулятор напруги L7809CV [11]

АКІТ 2024

### 5.2 Блок керування вологості ґрунту

Система автоматичного поливу з Arduino працює у середовищі за кімнантної температури при атмосферному тиску 750мм.рт.ст за допомогою датчика вологості, який визначає рівень вологи у відкритому ґрунті. Мікроконтролер Arduino Nano запрограмований на зчитування значень датчика і активацію водяного насоса, коли вологість падає нижче заданого порогу. Потім водяний насос подає воду до рослин, доки рівень вологості знову не досягне заданого порогу. Цей автоматизований процес гарантує, що рослини отримують потрібну кількість води, навіть коли власник відсутній.

Система працює за алгоритмом, який показаний на рисунку нижче.

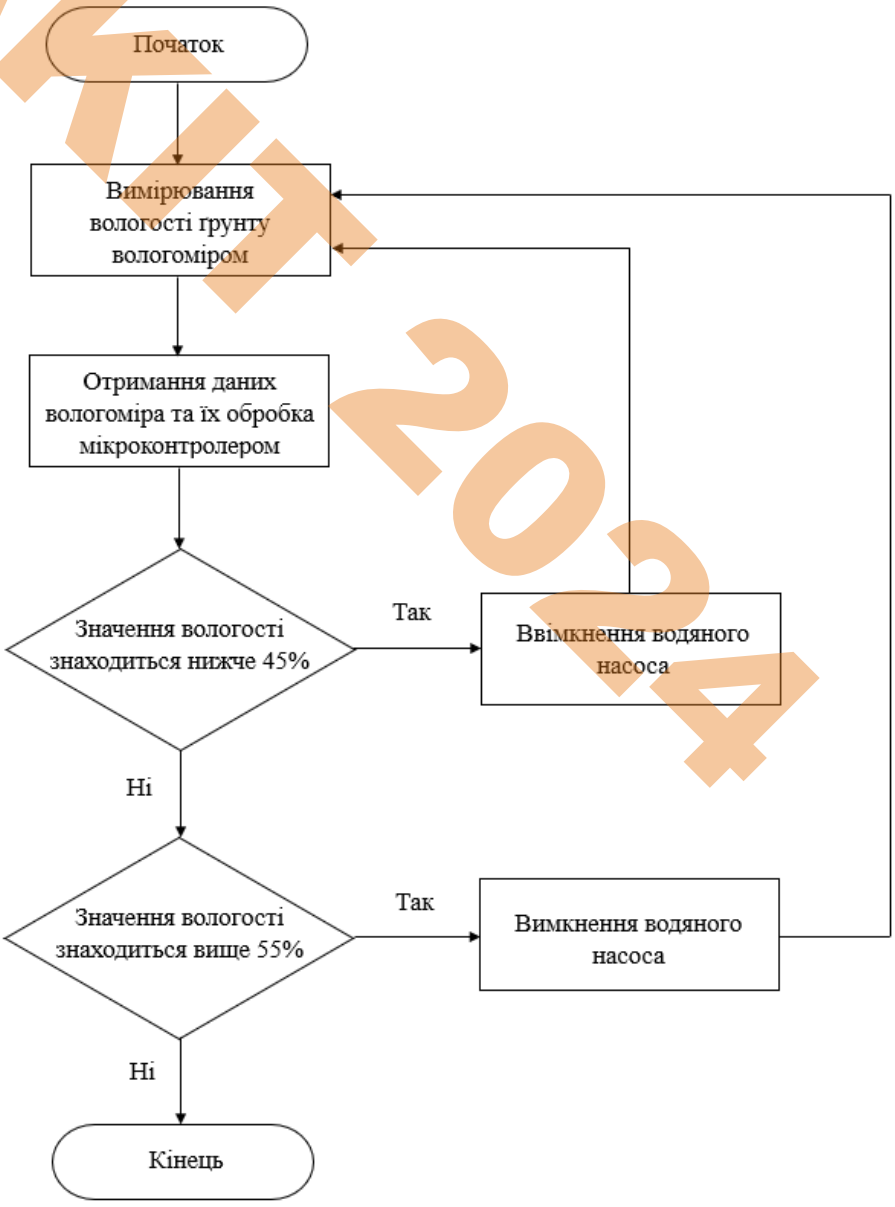


Рисунок 5.5 – Алгоритм роботи блоку керування вологості ґрунту

АКІТ 2024

Роботу системи зрошення чітко описано в наступних пунктах:

- живлення: система живиться від джерела живлення 12 В, підключеного до плати Arduino. Живлення регулюється за допомогою стабілізатора напруги, щоб забезпечити стабільну напругу 9 В постійного струму для Arduino Nano;

- зчитування показань датчика: система використовує ємнісний датчик вологості ґрунту, підключений до аналогового входу Arduino;

- розрахунок вологості: аналогове значення з датчика переводиться у відсоток вологості за допомогою попередньо визначених порогових значень для повітря та води;

- РК-дисплей: відсоток вологості відображається на РК-дисплеї 16x2, підключеному до Arduino;

- релейне керування: на основі відсотка вологості Arduino приймає рішення про ввімкнення або вимкнення системи поливу. Якщо відсоток вологості нижче 45, що вказує на низький рівень вологості, Arduino встановлює вивід реле в положення LOW, вмикаючи реле, підключене до насоса. Це активує насос і запускає процес поливу;

- індикація стану насоса: РК-дисплей відображає стан насоса у другому рядку. Якщо насос увімкнено, відображається напис "Насос: увімк.". Якщо відсоток вологості перевищує 55, що вказує на достатню кількість вологи, Arduino встановлює вивід реле на HIGH, вимикаючи реле і вказуючи на те, що насос повинен бути вимкнений. У цьому випадку на РК-дисплеї відображається напис "Насос: вимк.";

- моніторинг і цикл: Arduino безперервно зчитує рівень вологості, оновлює РК-дисплей і перевіряє відсоток вологості, щоб визначити стан насоса.

Пристрій живиться від блоку живлення на 12 В за допомогою адаптера постійного струму на 12 В, підключеного до гнізда живлення. Причиною використання джерела живлення на 12 В є те, що і реле, і двигун потребують джерела живлення на 12 В. Для регулювання напруги використовується стабілізатор напруги L7809. Регулятор L7809 перетворює вхідну напругу 12В постійного струму в стабільну вихідну напругу 9В постійного струму.

Електричну принципову схему блоку керування вологості ґрунту показано на рисунку 5.7.

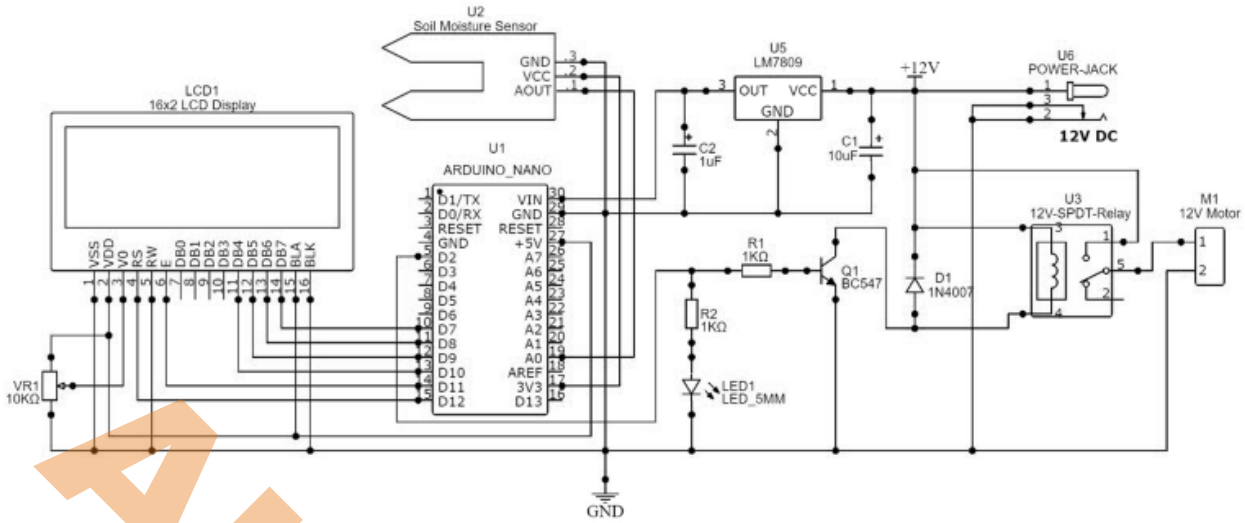


Рисунок 5.7 – Електрична принципова схема блоку керування вологості ґрунту [12]

Програмний код системи зрошування (див. додаток В) написаний за допомогою програми Arduino IDE, також варто додати, що він потребує використання бібліотеки LiquidCrystal, щоб керувати РК-модулем, підключеним до виводів Arduino 12, 11, 10, 9, 8 і 7.

Код зчитує аналогове значення з датчика вологості ґрунту, підключеного до аналогового виводу A0. На основі зчитування вологості він обчислює відсоток вологості і відображає його на РК-дисплеї.

За потреби дана система автоматичного регулювання вологості ґрунту може бути інтегрована у теплицю, парник чи приміщення невеликих розмірів, оскільки вона використовує малу кількість компонентів та має невеликі розміри.

АКІТ-2024

# ВИСНОВКИ

В даній бакалаврській роботі було проаналізовано сучасні автоматизовані системи поливу рослин, а також з чого вони складаються. Такими системами є: крапельна; спрінклерна та підґрунтова.

Наступним було пояснено, що вологість – це максимально допустиме насичення повітря вологою. А також описано її види концентрацій, а саме абсолютну та відносну вологості, які вимірюються у см/г$^3$ та відсотках відповідно.

Варто відмітити, що в цій роботі наведено 4 методи вимірювання вологості ґрунту, кожен з яких використовує різну апаратуру для вимірювання та має свої переваги й недоліки. Такими методами є:

а) гравіметричний;

б) нейтронного розсіювання;

в) тензіометричний;

г) ємнісний.

З даних чотирьох методів було використано ємнісний, оскільки він є відносно недорогим, простим у застосуванні та забезпечує досить точні показники вимірювань.

Далі була розроблена математична модель системи автоматичного регулювання вологості ґрунту, яка включала в себе виведення передатних функцій з аперіодичних ланок першого порядку, розробку функціональної та структурної схем САР, а також аналіз САР на стійкість за критеріями Гурвіца, Михайлова та Найквіста. Важливим моментом є те, що межі стійкості системи були визначені за допомогою методу D-розбиття.

Головним результатом бакалаврської роботи став розроблений блок керування вологості ґрунту. Він включає наступні вузли (компоненти): датчик вимірювання вологості ґрунту, мікроконтролер Arduino Nano, електромеханічне реле та стабілізатор напруги. Також розроблено алогоритм, функціональну та електричну принципову схеми. Даний блок успішно виконує технічне завдання. Система підтримує рівень вологи у діапазоні 45-55%. Полив у ній реалізується за

АКІТ 2024

допомогою закладених значень у програмному коді, отже він не потребує участі людини. Блок керування використовує невелику кількість компонентів, що робить його малогабаритним, а це дозволяє йому бути використаним у невеликих приміщеннях. Стан рівня вологості ґрунту та чи задіяний водяний насос на поточний момент завжди можна переглянути у будь-який момент, завдяки виведенню їх на підключений РК-дисплей.

АКІТ 2024

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ


1. Крапельний полив 200/50см 16мм багаторічний з емітером. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://svoyak-market.com.ua/ua/p705717673-kapelnoe-oroshenie-20050sm.html
2. Полив газону. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://ecomir.in.ua/uk/hazon-ukr/polyv-dilianky/polyv-hazonu
3. Ефективність та економія у зрошенні з підземним крапельним поливом. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://avtopoliv.com.ua/efektyvnist-ta-ekonomiia-u-zroshenni-z-pidzemnym-krapelnym-polyvom/
4. Що таке абсолютна і відносна вологість? [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://venta.com.ua/ukr/articles/physics.html
5. Вологість повітря. Методи вимірювання вологості повітря [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://pobut.lviv.ua/articles/volog
6. Методи вимірювання вологості ґрунту. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://propozitsiya.com/ua/metody-vymiryuvannya-vologosti-gruntu
7. Grove - Capacitive Moisture Sensor (Corrosion Resistant). [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://wiki.seeedstudio.com/Grove-Capacitive_Moisture_Sensor-Corrosion-Resistant/
8. Ємнісний датчик вологості ґрунту V2.0. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://diyshop.com.ua/ua/emkostnyj-datchik-vlazhnosti-pochvy-v2-0
9. Nano V3.0, Nano Board ATmega328P 5V 16M Micro-Controller Board Compatible with Arduino IDE. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.amazon.com/LAFVIN-Board-ATmega328P-Micro-Controller-Arduino/dp/B07G99NNXL
10. Реле електромеханічне АСКО MY2 AC220V. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://amperok.com.ua/rele_elektromehanichne_asko_my2_ac220v_a0090010005




АКІТ 2024

11. L7809CV L7809 7809 Voltage Regulator IC Linear 9V 1.5A TO220AB TO-220. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.amazon.com/Juried-Engineering-L7809CV-Regulator-Breadboard-Friendly/dp/B07CWQCNCD

12. Automatic irrigation and plant watering system. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.hackster.io/diyprojectslab/automatic-irrigation-and-plant-watering-system-13b32d

АКІТ 2024

# ДОДАТКИ

## Додаток А

## ТАБЛИЦЯ ГУСТИНИ І ТИСКУ НАСИЧЕНОЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ ЗА ТЕМПЕРАТУРИ ВІД 0 ДО 30°С

| $t$, °С | $\rho_н$, г/м³ | $p_н$, мм рт. ст. |
|---|---|---|
| 0 | 4,8 | 4,6 |
| 1 | 5,2 | 4,9 |
| 2 | 5,6 | 5,3 |
| 3 | 6,0 | 5,7 |
| 4 | 6,4 | 6,1 |
| 5 | 6,8 | 6,6 |
| 6 | 7,3 | 7,0 |
| 7 | 7,8 | 7,6 |
| 8 | 8,3 | 8,0 |
| 9 | 8,8 | 8,6 |
| 10 | 9,4 | 9,2 |
| 11 | 10,0 | 9,8 |
| 12 | 10,7 | 10,5 |
| 13 | 11,4 | 11,2 |
| 14 | 12,1 | 12,0 |
| 15 | 12,8 | 12,0 |
| 16 | 13,6 | 13,6 |
| 17 | 14,5 | 14,5 |
| 18 | 15,4 | 15,5 |
| 19 | 16,3 | 16,5 |
| 20 | 17,3 | 17,5 |
| 21 | 18,3 | 18,7 |
| 22 | 19,4 | 19,8 |
| 23 | 20,6 | 21,1 |
| 24 | 21,8 | 22,4 |
| 25 | 23,0 | 23,8 |
| 26 | 24,4 | 25,2 |
| 27 | 25,8 | 26,7 |
| 28 | 27,2 | 28,4 |
| 29 | 28,7 | 30,0 |
| 30 | 30,3 | 31,8 |

Рисунок А.1 – Таблиця густини і тиску насиченої водяної пари за температури від 0 до 30°с

АКІТ 2024

**Додаток Б**

**ПРОГРАМНИЙ КОД БЛОКУ КЕРУВАННЯ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ**

```
#include <LiquidCrystal.h>

LiquidCrystal lcd(12, 11, 10, 9, 8, 7);
const int AirValue = 600;
const int WaterValue = 310;
const int ThresholdValue = 484;
int soilMoistureValue = 0;
const int RelayPin = 2;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  lcd.begin(16, 2);
  pinMode(RelayPin, OUTPUT);
  digitalWrite(RelayPin, HIGH);
}

void loop()
{
  soilMoistureValue = analogRead(A0);
  Serial.println(soilMoistureValue);

  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Moisture: ");
  float moisturePercentage = map(soilMoistureValue, AirValue, WaterValue, 0, 100);
  lcd.print(moisturePercentage, 0);
  lcd.print("%");
```

АКІТ 2024

```
  int upperLimit = ThresholdValue + 0.1 * (AirValue - WaterValue);
  int lowerLimit = ThresholdValue - 0.1 * (AirValue - WaterValue);
  if (moisturePercentage < 45.0)
  {
    digitalWrite(RelayPin, LOW);
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Pump: ON ");
  }
  else if (moisturePercentage > 55.0)
  {
    digitalWrite(RelayPin, HIGH);
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Pump: OFF");
  }
  else
  {
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Pump: ");
    if (digitalRead(RelayPin) == LOW)
    {
      lcd.print("ON");
    }
    else
    {
      lcd.print("OFF");
    }
  }
  delay(250);
  lcd.clear();
}
```

АКІТ 2024

## Додаток В

## ПЕРЕЛІК ЕЛЕМЕНТІВ, ЯКІ ВИКОРИСТАНІ У ЕЛЕКТРИЧНІЙ ПРИНЦИПОВІЙ СХЕМІ БЛОКУ КЕРУВАННЯ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ

Таблиця В.1 – Перелік елементів, які використані у електричній принциповій схемі блоку керування вологості ґрунту

| Назва компоненту | Кількість |
|---|---|
| Мікрокнотролер Arduino Nano | 1 |
| Ємнісний датчик вологості ґрунту CSMS V2 | 1 |
| РК-дисплей 16x2 | 1 |
| Стабілізатор напруги L7809 | 1 |
| Електромеханічне реле MY2 AC220V | 1 |
| Двигун 12В | 1 |
| Резистор 1кОм | 2 |
| Варистор 10кОм | 1 |
| Транзистор | 1 |
| Конденсатор | 2 |
| Діод | 1 |
| Світлодіод | 1 |

АКІТ 2024