МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М.Потебні

Кафедра електроніки, інформаційних систем
та програмного забезпечення
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

перший (бакалаврський)
(рівень вищої освіти)

на тему: *Розробка схеми для контролю наповнення резервуарів для води на базі Arduino*

Виконав: студент 4 курсу, групи 6.1532
спеціальності *153 «Мікро- та наносистемна техніка»*
(код і назва спеціальності)
освітньої програми *«Мікро- та наносистемна техніка»* (код і назва освітньої програми)
Глуховський Едуард Романович
(ініціали та прізвище)

Керівник професор кафедри ЕІСПЗ, доцент, к.т.н.
Ніконова Зоя Андріївна
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент інженер-конструктор ТОВ
«Конструкторське бюро Колосова»

Григор'єва Ірина Костянтинівна
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЗАТВЕРЖУЮ

Завідувач кафедри _____

“ ” _____року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Глуховському Едуарду Романовичу
(прізвище, ім’я, по батькові)

1 Тема роботи *Розробка схеми для контролю наповнення резервуарів для води на базі Arduino*

Керівник роботи професор Ніконова Зоя Андріївна

Затверджені наказом ЗНУ від “ ” 2026 року №

2 Строк подання студентом роботи: 21 травня 2026року

3 Вихідні дані до роботи: мікроконтролер Arduino, ультразвуковий датчик рівня рідини, частота 135Гц, рідкокристалічний дисплей, виконавчий механізм (насос), значення опору , струму 200мА, напруги 6В, параметри резервуарів, програмний код керування системою

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) РОЗДІЛ 1 Особливості використання пристроїв контролю наповнення резервуарів рідини, РОЗДІЛ 2 Розробка структурної та електричної принципової схем пристрою для контролю наповнення резервуарів води на базі Arduino, РОЗДІЛ 3 Охорона праці та безпека життєдіяльності

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов’язкових креслень) Л1– Принципова схема автоматичної системи водопостачання, Л2– Принципова схема управління та регулювання напруги системи, Л3 – Програмний код системи контролю рівня рідини, Л4- Експериментальний стенд системи контролю рівня рідини та перевірка роботи

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Ніконова З.А	09. 02 .2026	09. 02 .2026
2	Ніконова З.А	09. 02 .2026	09. 02 .2026
3	Ніконова З.А	09. 02 .2026	09. 02 .2026

7. Дата видачі завдання 09 лютого 2026 року

КАЛЕДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Особливості використання пристроїв контролю наповнення резервуарів рідини	09.02.26- 01.03.26	
2	Розробка структурної та електричної принципової схем пристрою для контролю наповнення резервуарів води на базі Arduino	02.03.26-30.04.26	
3	Охорона праці та безпека життєдіяльності	01.05.26.- 20.05.26	
4	Оформлення графічної частини	21.05.26- 31.05.26	
5	Оформлення пояснювальної записки	01.06.26-17.06.26	
6	Захист кваліфікаційної роботи	18.06.26	

Студент _____ Глуховський Е.Р.

(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проекту) _____ Ніконова З.А.

(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Верьовкін Л.Л.

(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота містить _90_ сторінок, _54_ рисунки, _3_ таблиці, _18_ джерел літератури

Об’єкт роботи – система контролю та автоматичного наповнення резервуарів для води.

Предмет роботи – електронні та програмні засоби контролю рівня води в резервуарах на базі мікроконтролера Arduino.

Мета роботи – дослідження та розробка схеми автоматичного контролю наповнення резервуарів води з використанням платформи Arduino.

Задачі роботи – проаналізувати методи та засоби вимірювання рівня рідини в резервуарах; дослідити принципи автоматизації процесів наповнення ємностей; побудувати схему системи контролю рівня води; розробити алгоритм роботи пристрою та програмне забезпечення для Arduino;

Методика дослідження –схемотехнічне та програмне проєктування, моделювання роботи пристрою з використанням систем автоматизованого проєктування Proteus та Arduino IDE.

Короткий виклад результатів досліджень: на підставі аналізу сучасних систем контролю рівня води розроблено структурну та електричну схему автоматичного пристрою наповнення резервуарів.

Результати впровадження – результати розробки та моделювання системи контролю наповнення резервуарів для води рекомендовано до використання в системах автоматичного пристрою.

ARDUINO, РЕЗЕРВУАР ДЛЯ ВОДИ, ДАТЧИК РІВНЯ, АВТОМАТИЧНЕ НАПОВНЕННЯ, МІКРОКОНТРОЛЕР, НАСОС, АВТОМАТИЗАЦІЯ

Кваліфікаційну роботу виконано на кафедрі ЕІСПЗ з 09_лютого по 30 червня 2026 року__.

ЗМІСТ

ВСТУП……7

РОЗДІЛ 1 ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПРИСТРОЇВ КОНТРОЛЮ НАПОВНЕННЯ РЕЗЕРВУАРІВ РІДИНИ…….9

1.1 Історія створення та розвитку пристроїв контролю наповнення резервуарів……...9

1.2 Сучасні способи та сфери використання резервуарів для рідин……16

1.3 Аналіз існуючих пристроїв контролю рівня рідини……20

1.4 Огляд вітчизняних та зарубіжних виробників пристроїв контролю наповнення резервуарів…….23

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМ ПРИСТРОЮ ДЛЯ КОНТРОЛЮ НАПОВНЕННЯ РЕЗЕРВУАРІВ ВОДИ НА БАЗІ ARDUINO……26

2.1 Вибір та обґрунтування структурної та електричної схем пристрою……26

2.2 Обґрунтування вибору елементної бази для електричної принципової схеми……...30

2.3 Розрахунок параметрів основних блоків пристрою……33

2.4 Розробка алгоритму функціонування схеми контролю наповнення резервуарів для води на базі Arduino……34

2.5 Розрахунок та розробка друкованої плати пристрою…….35

2.6 Розрахунок блоку управління напруги плати Arduino UNO……..40

2.7 Розрахунок блоку мікроконтролерів плати Arduino UNO……..42

2.8 Розрахунок блоку вимірювання води……...52

2.9 Розрахунок блоку приймального ультразвукового датчику……..54

2.10 Розрахунок блоку першого каскаду підсилення……56

2.11 Розрахунок блоку другого каскаду підсилення…….59

2.12 Розрахунок блоку детектору ехосигналу...……62

2.13 Розрахунок блоку фільтру сигналу…….64
2.14 Розрахунок блоку формувачу сигналу для MCU……...66
2.15 Розрахунок блоку передавального ультразвукового каскаду……..68
2.16 Опис програмної частини системи……70
2.17 Демонстрація роботи системи...……74
РОЗДІЛ 3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ…..79
3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів……..79
3.2 Заходи з поліпшення умов праці……...83
3.3 Пожежна безпека……...84
3.4 Техногенна безпека……85
3.5 Розрахунок захисного заземлення……86
ВИСНОВКИ……88
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……89

ВСТУП

В умовах сучасного життєзабезпечення водні ресурси набувають усе більшої значущості як для побутових, так і для промислових, аграрних та екстрених потреб. Резервуари для води відіграють ключову роль у накопиченні, зберіганні та забезпеченні безперервного водопостачання як у містах, так і в сільській місцевості. Сучасні ємності для води можуть бути виготовлені з різних матеріалів — від пластику до металу — і застосовуються не лише для збереження питної води, а й для технічних та господарських цілей. Наприклад, пластикові баки забезпечують збереження чистоти та якості води, економію ресурсів та автономність від централізованого водопостачання, що особливо важливо під час перебоїв або дефіциту води у певних регіонах. Вони також широко використовуються для зрошення земель та у випадках надзвичайних ситуацій, коли доступ до питної води може бути обмежений.

Сьогодні резервуари для води застосовуються не лише у великих обсягах на підприємствах і в господарствах, але й у приватних домогосподарствах, де необхідно забезпечити безперебійну подачу води незалежно від графіка централізованого водопостачання. У багатьох країнах, зокрема в Індії, характерною практикою є облаштування двох джерел води: підземного резервуару для накопичення та міської мережі водопостачання, з яких або з одного, або з іншого джерела здійснюється наповнення верхнього резервуару для забезпечення потреб мешканців. Такий підхід дозволяє гнучко реагувати на зміни у доступності води, але одночасно вимагає постійного контролю рівня води у баках для уникнення її витрат або переливання. Саме проблема ефективного контролю рівня води у резервуарах під час наповнення є нагальною в тих випадках, де процес відбувається вручну.

У традиційних системах ручне вмикання та вимикання електричного водяного насоса для наповнення резервуара залежить від постійного моніторингу людиною поточного рівня води, що є трудомістким, не завжди

точним та може призводити до втрат води у вигляді переливання з верхнього бака. Ураховуючи зростання потреб у раціональному використанні водних ресурсів, автоматизація такого процесу стає одним із ключових напрямів підвищення ефективності водопостачання. Автоматичний контроль рівня води дозволяє оптимізувати використання насосного обладнання, уникати невиправданих витрат електроенергії, забезпечувати своєчасне наповнення резервуарів та підтримувати заданий рівень без безпосереднього втручання людини. За даними сучасних IoT-систем, автоматичні контролери рівня води здатні не лише вмикати чи вимикати насос залежно від поточного рівня, але й значно зменшувати ризики переливу та сухого ходу насоса, що позитивно впливає на довговічність обладнання.

У зв’язку з цим, розробка доступної, надійної та гнучкої схеми контролю наповнення резервуарів на базі популярної мікроконтролерної платформи Arduino є актуальною як для побутового використання, так і для впровадження у системи розумного дому, малого бізнесу або сільського господарства. Такий підхід дозволяє реалізувати автоматичне наповнення верхнього баку без участі оператора, знизити витрати водних і енергетичних ресурсів, а також створити гнучке рішення, що може бути адаптоване під різні конфігурації резервуарів та джерел води.

РОЗДІЛ 1 ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПРИСТРОЇВ КОНТРОЛЮ НАПОВНЕННЯ РЕЗЕРВУАРІВ РІДИНИ

1.1 Історія створення та розвитку пристроїв контролю наповнення резервуарів

Моніторинг рівня рідини – це процес визначення об’єму рідини в резервуарах, резервуарах або інших ємностях. Цей контроль є важливим компонентом систем водопостачання, виробничих процесів, енергетичної промисловості, сільського господарства та багатьох інших галузей. Сучасні датчики рівня рідини зазнали значної еволюції – від примітивних механічних конструкцій до високотехнологічних автоматизованих електронних систем.

Історія вимірювання рівня рідини передує появі електроніки – вона виникла з необхідності контролювати рівень води в природних водоймах для економічних та навігаційних цілей. Найстарішим і найпростішим методом вимірювання було використання водоміра – градуйованої вертикальної рейки, встановленої безпосередньо у резервуарі для вимірювання рівня води. Цей пристрій надавав інформацію про повені та глибину води, необхідну для безпечного річкового судноплавства, і фактично служив прототипом для всіх наступних пристроїв контролю рівня рідини.

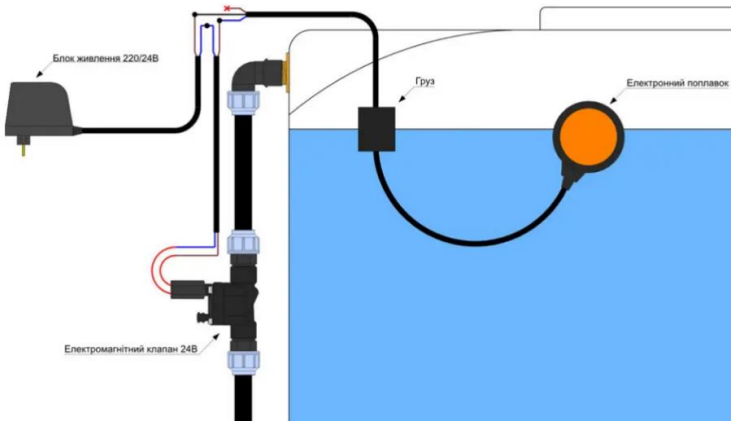


Рисунок 1.1 – Поплавковий вимикач рівня рідини

У 20 столітті, з розвитком електричних та електронних технологій, контроль рівня рідини почав набувати нових характеристик: вищу точність, вищу швидкість вимірювання та можливість інтеграції з автоматизованими системами керування. Особливо з 1950-х по 1970-ті роки почали широко використовувати контактні датчики рівня (контактні поплавкові вимикачі). Ці датчики не тільки випромінювали сигнали, коли рівень рідини досягав певного значення, але й автоматично підключали або відключали ланцюги.

Поплавковий вимикач був першим кроком до автоматизації — він поєднував механічний поплавок з вимикачем, який міг реагувати на рух. З розвитком електронних технологій та мікропроцесорних систем сфера застосування технології контролю рівня рідини поступово значно розширилася. На рубежі 20 століття з'явилися гідростатичні датчики рівня, які вимірювали рівень рідини, вимірюючи тиск на певній глибині.

Ще одним важливим етапом стала поява ємнісних та резистивних датчиків рівня. Ємність між електродами цих датчиків змінюється залежно від наявності або відсутності рідини, що дозволяє здійснювати точне вимірювання рівня без механічного контакту.

Цей метод заклав основу для безконтактного вимірювання, особливо придатного для ситуацій, коли контакт з навколишнім середовищем неможливий через корозію або забруднення. З другої половини 20-го століття до початку 21-го століття, з розвитком електронних технологій, цифрових систем керування та мікроконтролерів, з'явилися ультразвукові та радарні датчики рівня.

Ультразвукові датчики працюють, вимірюючи час, необхідний звуковим хвилям для проходження до поверхні рідини та від неї, таким чином визначаючи рівень без контакту з навколишнім середовищем. Радарні рівнеміри використовують високочастотні електромагнітні хвилі для вимірювання, що забезпечує вищу точність та здатність працювати в складних умовах (наприклад, за наявності піни або пари).

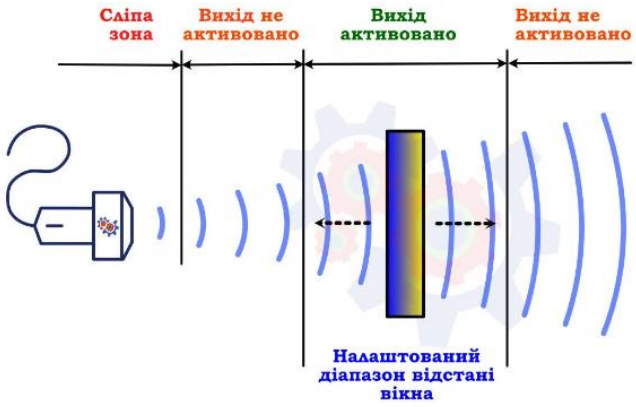


Рисунок 1.2 – Приклад роботи ультразвукового датчику рівня води

У кінці 20-го століття, коли автоматизація на заводах стала звичайною справою, датчики рівня рідини теж почали змінюватися. У 80-х і 90-х роках з'явилися програмовані контролери (ПЛК). Завдяки їм датчики рівня рідини почали працювати разом з іншими пристроями, контролюючи виробництво. Для заводів це був великий плюс, тому що контроль рівня рідини став частиною великої автоматизованої системи. Тоді ж стали використовувати міжнародні стандарти для сигналів, наприклад, 4-20 мА і 0-10 В. Такі стандарти й зараз застосовують у датчиках рівня. Це дозволило пристроям від різних виробників працювати разом і зробило системи контролю рівня більш надійними.

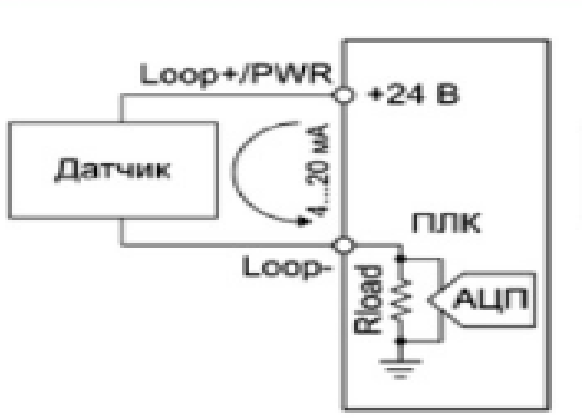


Рисунок 1.3 – Двухпровідне під’єднання датчику

Виміряти струм 4-20 мА аналоговим входом контролера Arduino або інших можна, зібравши попередньо таку схемку:

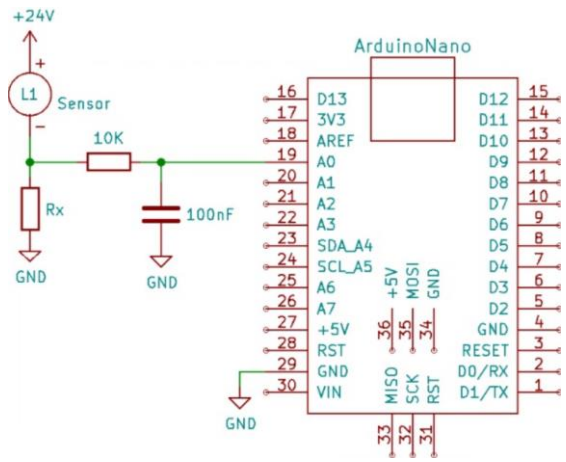


Рисунок 1.4 – Схема замірів струму аналоговим входом контролеру Arduino

Номінал резистора Rx можна порахувати за простою формулою

$$Rx = \frac{Uplc}{0{,}02A}$$

Коротше кажучи, 0,02 А - це те саме, що 20 мА. Uplc - це найбільша напруга, яку може сприйняти контролер. В Arduino, наприклад, це 5 В, а в ESP32 - близько 3 В. Ось як вирахувати опір для Arduino Nano:

$$5\text{В} / 0{,}02\ \text{А} = 250\ \text{Ом}$$

а для ESP32:

$$3\text{В} / 0{,}02\ \text{А} = 150\ \text{Ом}$$

Для напруги 3,3 В потрібен резистор на 165 Ом (або 160 Ом, якщо хочете заощадити). Важливо вибрати точний приймальний резистор (Rx), щоб температура повітря не впливала на вимірювання.

Далі необхідно зібрати схему та виміряти напругу на резисторі через аналоговий вхід контролера. У обраному випадку це Arduino Nano та гідростатичний датчик рівня з двопровідним живленням і струмовим сигналом 4-20 мА.

Спочатку, заради безпеки, використовується лабораторний блок живлення замість датчика. За розрахунками Arduino, опір має бути 250 Ом, але через неточність резистора результат може трохи вийти за межі діапазону вимірювання аналогового входу, тому необхідний резистор на 220 Ом.

Надалі завантажується код в Arduino IDE. Програма зчитуватиме значення з аналогового входу A0 і виводитиме його в монітор порту. Потім завантажується програма в контролер.

```
const byte sensorPin = A0;
int sensorValue = 0;

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

void loop() {
  sensorValue = analogRead(sensorPin);
  Serial.println(sensorValue);
  delay(500);
}
```

Рисунок 1.5 – Код до програми в Arduino IDE

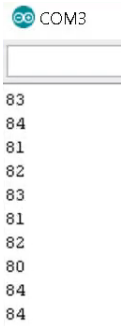


Рисунок 1.6 – Значення напруги на резисторі через аналоговий вхід

Попередньо повертається резистор, щоб звести напругу на виході блока живлення до мінімуму. Потім обережно збільшується напруга, поки амперметр не покаже струм у 4 мА.

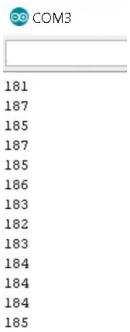


Рисунок 1.7 – Значення напруги на резисторі при досягненні струму 4 мА

ЦЕ число буде відповідати мінімальному значенню на шкалі датчика. Далі збільщується струм через резистор до 20 мА.

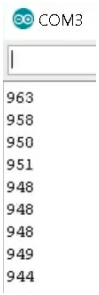


Рисунок 1.8 – Значення напруги на резисторі при досягненні струму 20 мА.

Максимум, що показав датчик, – 928.

Щоб можна було перевірити, чи не виходить вимірювання за межі норми, краще лишити трохи запасу в значеннях аналогового входу. Наприклад, поставити резистор на 220 Ом замість 250 Ом, щоб зменшити вхідну шкалу. Так само можна зробити й навпаки. Скажімо, у вас є датчик рівня на 3 метри, але потрібно точно міряти від 0 до 2 метрів. У такому разі краще збільшити опір, щоб на 2 метрах отримувати максимум шкали аналогового входу.

Для перетворення використовується формула масштабування. Звичайна функція (map не підійде, бо вона працює тільки з цілими числами (int), а нам потрібні дробові (float). Ось формула, яка допоможе все порахувати: змінна L1 (тип float) показуватиме рівень у метрах. sensorValue – це значення з аналогового входу; 185 – значення при струмі датчика 4 мА; 2,5 – максимум шкали датчика (в метрах); 0,0 – мінімум шкали датчика (в метрах); 928 – значення при 20 мА; останнє 0,0 – це зміщення шкали в метрах. Якщо, наприклад, датчик стоїть на висоті 20 см від дна бака, то тут треба вписати 0,2 (в метрах).

До монітора порту передаються як машинні значення, так і рівень води в метрах. Необхідно завантажити програму у контролер і перевірити ефективність формули на практиці.

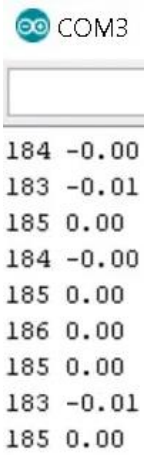


Рисунок 1.9 – Значення метрів на резисторі при досягненні струму 4 мА

При 4 мА рівень буде 0 метрів, тепер підіймається струм до максимальних 20 мА

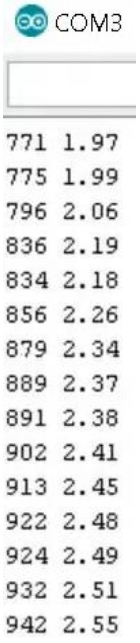


Рисунок 1.10 – Значення метрів на резисторі при досягненні струму 20 мА

Отримано 2,5 метри, а отже формула працює.

У 21 столітті, з развитком технологій в області вбудованиї систем управління, з’явились доступі платформи Arduino. що дало можливість мікроконтролерам розробляти умні системи, які не просто вимірюють рівень, але й реагують на зміну по заданим алгоритмам.

1.2 Сучасні способи та сфери використання резервуарів

Резервуари для рідин – важлива частина сучасної інфраструктури. Вони потрібні для того, щоб збирати, перевозити і регулювати подачу різних рідин. Сьогодні є багато різних видів резервуарів, зроблених з різних матеріалів і для різних цілей. Завдяки розвитку технологій, ці резервуари стали надійнішими, довговічнішими і краще виконують свої функції.

Одне з головних місць, де використовуються резервуари, – це системи водопостачання. Ще в Стародавньому Римі, приблизно в I столітті до нашої ери, почали будувати централізовані резервуари для води. Римські акведуки доставляли воду в цистерни, де її зберігали. Наприклад, Цистерна Базиліка в Константинополі, побудована в 532 році за наказом імператора Юстиніана I, була величезним водосховищем, яке забезпечувало жителів міста питною водою.



Рисунок 1.12 – Цистерна Базиліка в Стамбулі

В сучасних системах водопостачання часто зустрічаються резервуари – як наземні, так і підземні – а ще водонапірні башти. Ці башти стали особливо популярними у XIX столітті, коли активно розвивалося централізоване водопостачання. Одним з перших, хто запропонував їх використання, був

британський інженер Вільям Ліндлі. Він розробляв проєкти водопостачання для різних європейських міст у 1840-х – 1860-х роках, і його внесок у розвиток цієї сфери важко переоцінити.

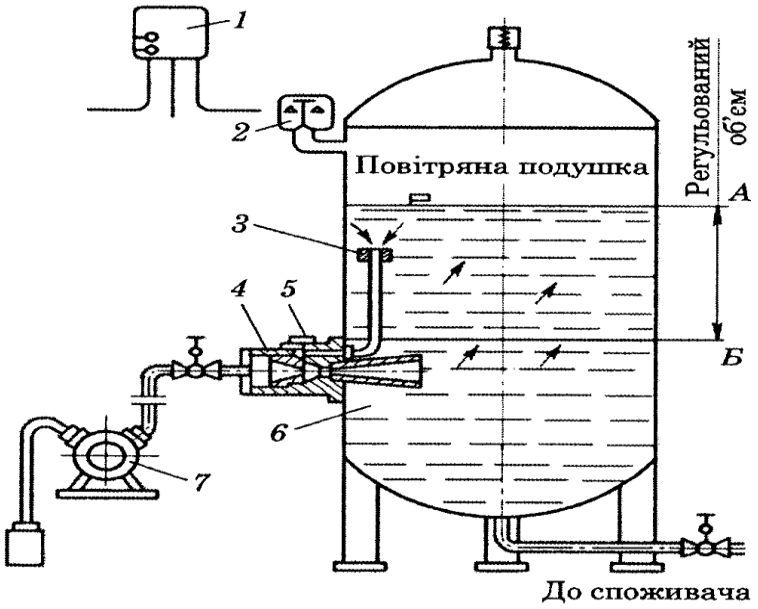


Рисунок 1.134– Конструкція водонапірної башти

Резервуари дуже важливі для промисловості. Вони потрібні на нафтових і хімічних заводах для зберігання нафти, хімікатів та інших рідин, що використовуються у виробництві. У кінці 19-го століття сталеві резервуари стали великим кроком уперед. У 1883 році інженер Генрі Роджерс з компанії Standard Oil почав використовувати великі сталеві баки для нафти. Це зробило зберігання нафти безпечнішим та дозволило зберігати більше.

Зараз промислові резервуари мають автоматичні системи, які стежать за рівнем рідини, температурою і тиском. Це робить їх роботу більш надійною і безпечною.

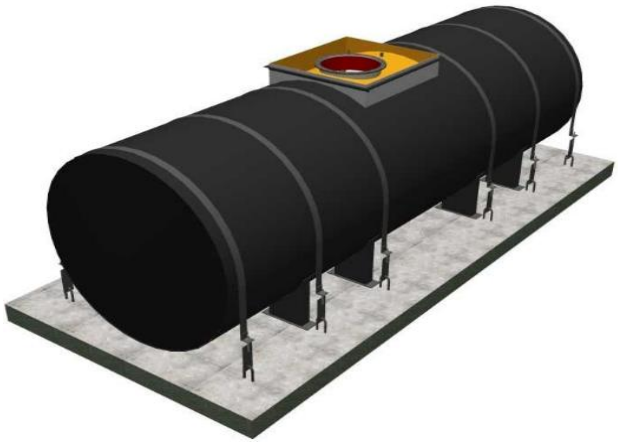


Рисунок 1.14 – Сталеві резервуари для зберігання нафти

В аграрному секторі резервуари дуже важливі для зберігання води для поливу та добрив. Їх почали активно застосовувати в системах зрошення в середині минулого століття, коли з'явився крапельний полив. У 1959 році ізраїльський інженер Сімха Бласс разом з Netafim почав впроваджувати сучасні технології крапельного зрошення, які включали використання резервуарів для збору та зберігання води.

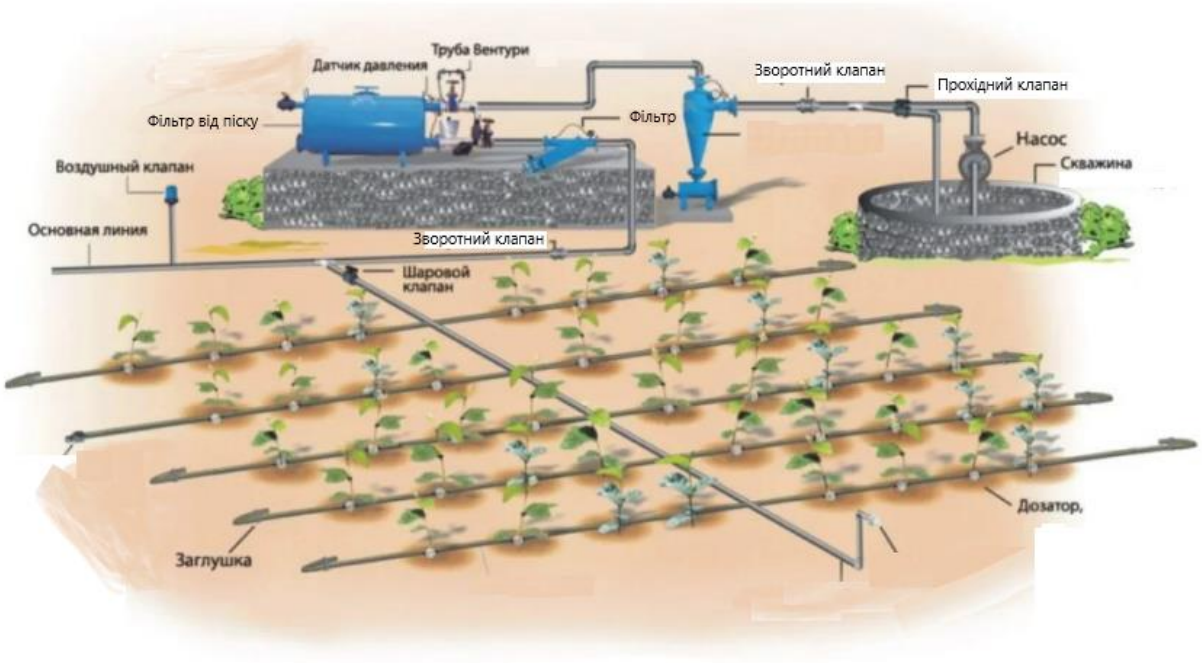


Рисунок 1.15 – Система крапельного зрошення з накопичувальним резервуаром

У наш час баки дуже важливі для тих, хто хоче мати власне водопостачання – чи то приватний будинок, чи багатоповерхівка, чи ще щось. Особливо це актуально там, де з водою перебої. Наприклад, у Південній Азії та Африці на дахах часто ставлять баки для зберігання води. Пластикові баки стали популярними десь у 1970-х, коли їх стало простіше і дешевше робити завдяки новим технологіям виробництва пластику.



Рисунок 1.16 – Пластиковий даховий резервуар для води

Використання резервуарів у протипожежних системах – важливий крок уперед. Вони забезпечують запас води для гасіння пожеж. Їх почали активно застосовувати у XX столітті з появою пожежної сигналізації та автоматичного гасіння.

Зараз резервуари часто мають автоматичний контроль рівня води, щоб в екстрених випадках завжди був потрібний об'єм.

1.3 Аналіз існуючих пристроїв контролю рівня рідини

Механічні пристрої з'явилися одними з перших, ще в XIX столітті. Їх можна вважати найпростішими з точки зору будови. Найвідоміший приклад – поплавковий механізм.

Розкажу трохи більше про те, як саме це працює. Уявіть собі резервуар з водою. У ньому плаває поплавок, з'єднаний з важелем.

У парових котлах такі механізми використовувалися для контролю рівня води, щоб котел не вийшов з ладу. У паливних баках вони показували, скільки пального залишилося, щоб вчасно зробити заправку. Ці прості, але надійні пристрої були дуже важливими для багатьох галузей промисловості.

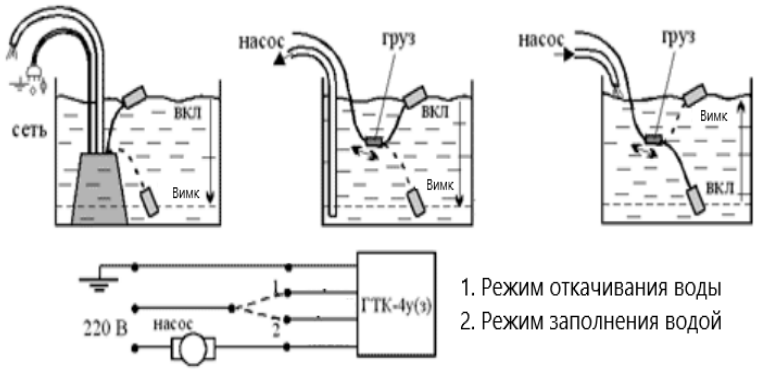


Рисунок 1.17 – Механічний поплавковий пристрій контролю рівня рідини

Механізми прості у своїй будові, не потребують зовнішнього живлення і зазвичай служать довго. Але є у них і слабкі місця.

З розвитком електроніки у другій половині минулого століття з'явилися електронні датчики рівня. Електродні датчики працюють за принципом зміни електричного опору між електродами, коли на них потрапляє рідина. Такі пристрої стали популярними в 60-70-х роках.

Резистивні датчики використовують поплавок, з'єднаний з потенціометром. Зі зміною рівня рідини змінюється положення поплавка, а отже, і опір потенціометра. Це дає змогу визначити рівень рідини. Обидва типи

датчиків мають свої переваги та недоліки. Електродні датчики прості та надійні, але чутливі до забруднень рідини, які можуть впливати на провідність. Резистивні датчики більш точні, але мають рухомі частини, що з часом можуть зношуватися.



Рисунок 1.18 – Електродний датчик рівня рідини

Електродні датчики – це прості пристрої, які можуть контролювати рівень рідини в кількох точках. Але є нюанс: вони працюють тільки з рідинами, які проводять електричний струм. Без цього ніяк.

Ще один вид – гідростатичні датчики. Їх почали активно використовувати ще в 70-х роках минулого століття. Вони вимірюють тиск рідини на певній глибині і так визначають рівень. Тут все базується на звичайних законах гідростатики: чим вищий стовп рідини, тим більший тиск. Проста і надійна схема.

Гідростатичні датчики більш універсальні в цьому плані. Вони не потребують електропровідності рідини. Все, що їм потрібно, – це виміряти тиск.

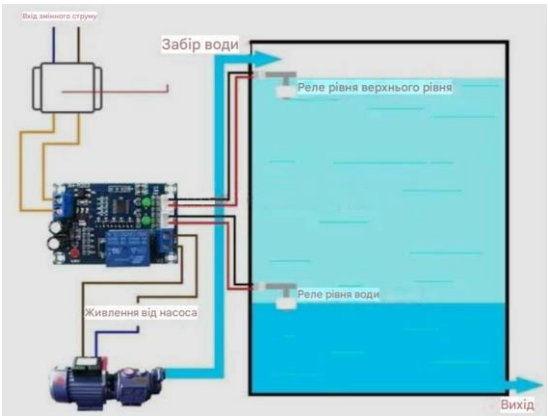


Рисунок 1.19 – Електродний датчик рівня рідини

Гідростатичні датчики вирізняються високою точністю та здатністю до безперервного контролю рівня, хоча їх робота залежить від густини та температури вимірюваної рідини. У 1980–1990-х роках набула популярності технологія ємнісних датчиків рівня, принцип роботи яких базується на зміні електричної ємності між електродами при зміні рівня рідини. Ці датчики бувають як контактними, так і безконтактними, що розширює сферу їхнього застосування.

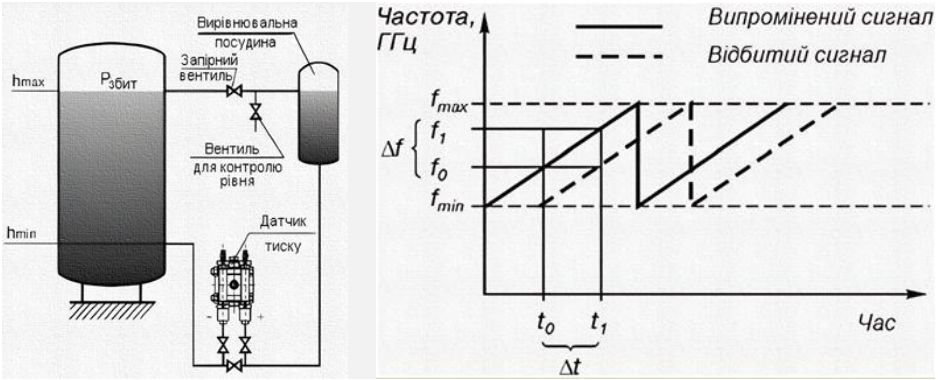


Рисунок 1.20 – Схеми встановлення датчика гідростатичного тиску

Найбільш сучасними вважаються безконтактні датчики рівня, зокрема ультразвукові та радарні, які отримали широке поширення наприкінці XX — на початку XXI століття. Ультразвукові датчики вимірюють рівень, аналізуючи час, за який звукова хвиля доходить до поверхні рідини та повертається назад. Радіолокаційні ж датчики працюють на основі використання електромагнітних хвиль.

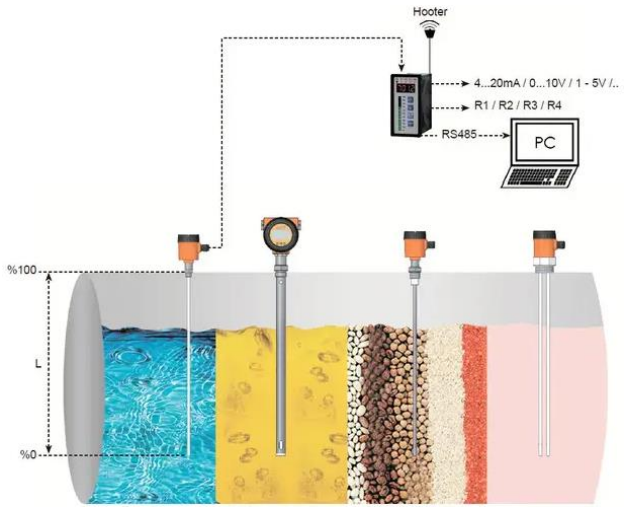


Рисунок 1.21 – Ємнісний датчик рівня рідини

1.4 Огляд вітчизняних та зарубіжних виробників пристроїв контролю наповнення резервуарів

Одним із світових лідерів у виробництві приладів для контролю рівня є швейцарська компанія Endress+Hauser AG. Її заснували Георг Ендресс і Людвіг Хаузер 1 лютого 1953 року. Вже до середини 1950-х років підприємство освоїло серійне виробництво приладів, призначених для вимірювання рівня рідин у різноманітних резервуарах. Асортимент продукції Endress+Hauser охоплює широкий ряд пристроїв, серед яких особлива увага приділена серіям Liquiphant (вібраційні датчики граничного рівня), Liquicap (ємнісні датчики рівня) та Micropilot (радарні безконтактні рівнеміри). Ці прилади активно використовуються для моніторингу рівня води, нафтопродуктів, хімічних розчинів, а також харчових рідин.



Рисунок 1.22 – Датчики рівня Endress+Hause

Одним із відомих світових виробників є компанія Danfoss A/S із Данії, заснована у 1933 році інженером Мадсом Клаусеном. Спочатку її діяльність була зосереджена на розробці холодильного обладнання, проте з часом асортимент продукції розширився і включив електронні пристрої для контролю рівня рідини.

Однією зі сучасних розробок компанії є модель Danfoss LLS 4000 — електронний датчик рівня рідини, який забезпечує ефективний моніторинг граничних значень у резервуарах. Цей пристрій характеризується цифровими налаштуваннями, високою надійністю та активно застосовується в автоматизованих промислових системах.



Рисунок 1.23 – Електронний сигналізатор рівня Danfoss LLS 4000

Компанія ifm electronic, заснована в Німеччині 26 жовтня 1967 року, спеціалізується на розробці інноваційних сенсорних систем і засобів автоматизації. У межах контролю рівня компанія пропонує широкий спектр рішень, включаючи ємнісні, ультразвукові та радарні датчики, які забезпечують як безперервне, так і граничне вимірювання рівня рідин.

Радарні датчики ifm вирізняються високою технологічністю, працюючи на частотах до 80 ГГц. Це дозволяє досягти найвищої точності вимірювань незалежно від впливу зовнішніх факторів, таких як температура, тиск або присутність пари.



Рисунок 1.24 – Радарні та ємнісні датчики рівня компанії ifm

Компанія FineTek із Тайваню займає окрему нішу на ринку та спеціалізується на виробництві ємнісних датчиків рівня. Однією з популярних серій її продукції є датчики FineTek SA, які функціонують на основі зміни електричної ємності залежно від зміни рівня рідини в резервуарі.

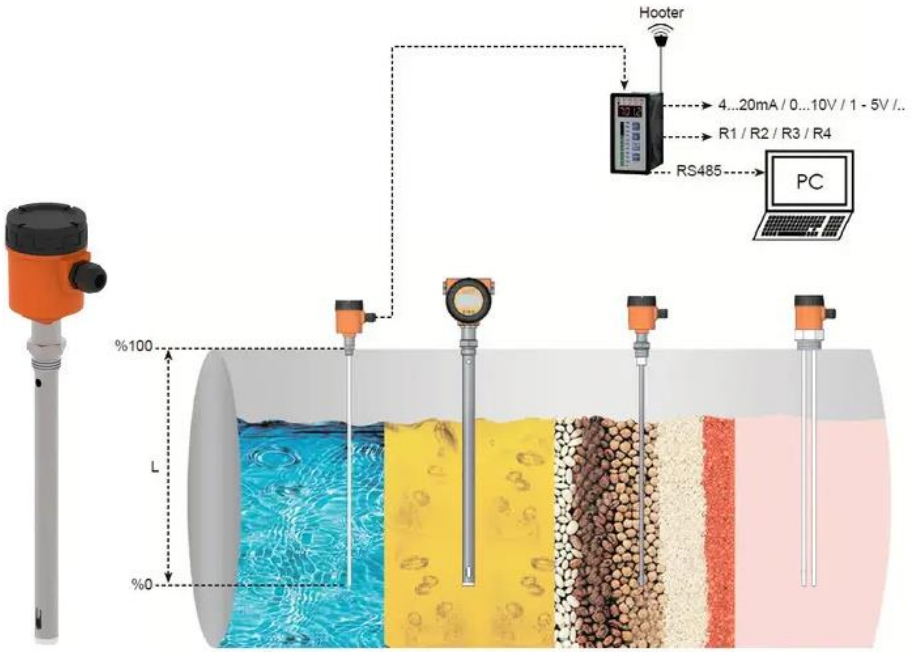


Рисунок 1.25 – Ємнісний датчик рівня FineTek серії SA

У сучасних системах автоматизації значне поширення отримали бездротові датчики рівня, зокрема пристрої Netvox, які передають дані про рівень рідини за допомогою технологій LoRaWAN або RS-485. Подібні рішення з 2015–2020 років активно впроваджуються у системах дистанційного моніторингу резервуарів.



Рисунок 1.26 – Бездротовий датчик рівня Netvox для резервуарів

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМ ПРИСТРОЮ ДЛЯ КОНТРОЛЮ НАПОВНЕННЯ РЕЗЕРВУАРІВ ВОДИ НА БАЗІ ARDUINO

2.1 Вибір та обґрунтування структурної та електричної схем пристрою

Запропонована система визначає рівень води в резервуарі на даху, перевіряє наявність достатньої кількості води в підземному резервуарі або водопроводі, а потім наповнює верхній резервуар до потрібного рівня, використовуючи будь-яке з двох доступних джерел. Такий підхід дозволяє забезпечити безперервність водопостачання та підвищити ефективність використання доступних ресурсів води у системі.

Наповнення резервуара через водопостачання контролюється електромагнітним клапаном, який виконує функцію автоматичного регулювання подачі води, а водяним насосом – контактором, що забезпечує комутацію силового кола насоса та його безпечну експлуатацію в умовах автоматизованої системи керування.

Прийняття рішень здійснюється за допомогою мікроконтролера в Arduino Nano та електронних пристроїв, таких як біполярні транзистори, MOSFET та діоди, які виконують функції керування, комутації та захисту електричних кіл.

Мікроконтролер виконує обробку сигналів, що надходять від датчиків рівня води, аналізує стан джерел водопостачання та формує відповідні керуючі сигнали для виконавчих елементів системи. Роботу можна пояснити на двох прикладах, які використовують різні джерела води залежно від їхньої доступності, що дозволяє продемонструвати логіку функціонування системи в різних експлуатаційних умовах.

Приклад 1:

Рівень води у верхньому резервуарі нижче 75%, а водопостачання

відсутнє. У цьому випадку вода буде заповнена через підземний резервуар за допомогою насоса, доки не буде досягнуто 75% рівня води.

Таким чином забезпечується автоматичне поповнення запасу води у верхньому резервуарі навіть за відсутності централізованого водопостачання, що підвищує надійність функціонування всієї системи водозабезпечення.

Приклад 2:

Рівень води у верхньому баку нижче 100%, і водопостачання від системи є. У цьому випадку вода буде заповнена через міську систему водопостачання до повної місткості бака. Такий режим роботи дозволяє ефективно використовувати доступне централізоване джерело води та зменшити навантаження на насосне обладнання. Після повного заповнення бака буде використано електромагнітний клапан, щоб зупинити наповнення бака, що забезпечує автоматичне припинення подачі води та запобігає можливому переповненню резервуара.

На рис. 2.1 показано основну ідею проєктування, яка ілюструє принцип організації системи автоматичного контролю та керування подачею води. А принципова схема автоматичної системи водопостачання показана на рис. 2.2.

Схема побудована на базі Arduino Nano (MOD1), 16 на 2 РК-дисплея з інтерфейсом I2C/IIC (MOD2), трьох транзисторів BC548, двох MOSFET-транзисторів IRF530 та реле.

Використання зазначених електронних компонентів дозволяє реалізувати функції вимірювання рівня води, індикації поточного стану системи, а також керування насосом і електромагнітним клапаном у повністю автоматичному режимі. Така архітектура системи забезпечує простоту реалізації, надійність роботи та можливість подальшого розширення функціональних можливостей у процесі модернізації.

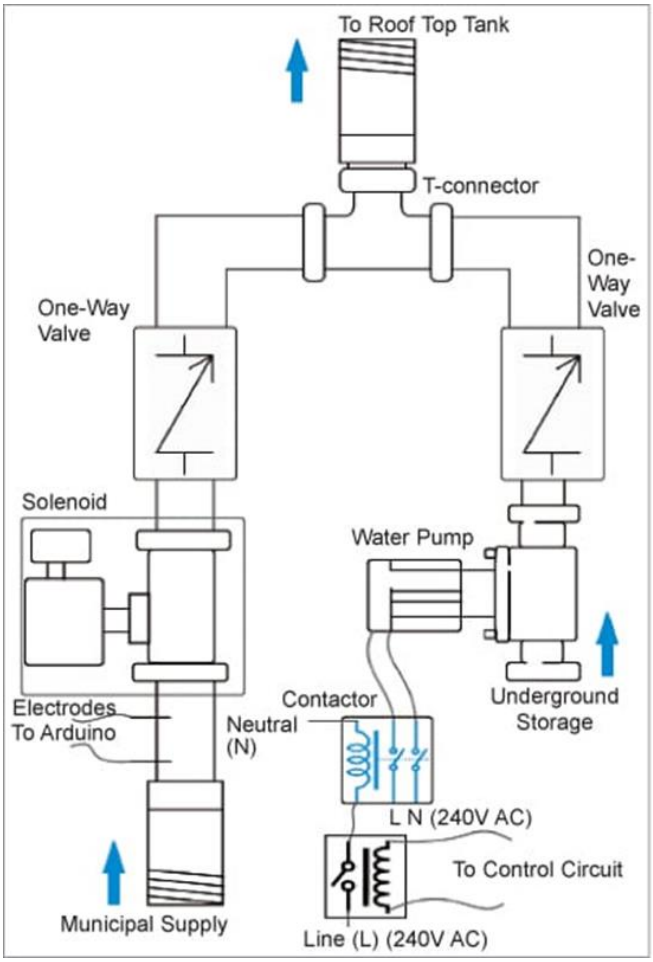


Рис. 2.1 – Базова робоча схема

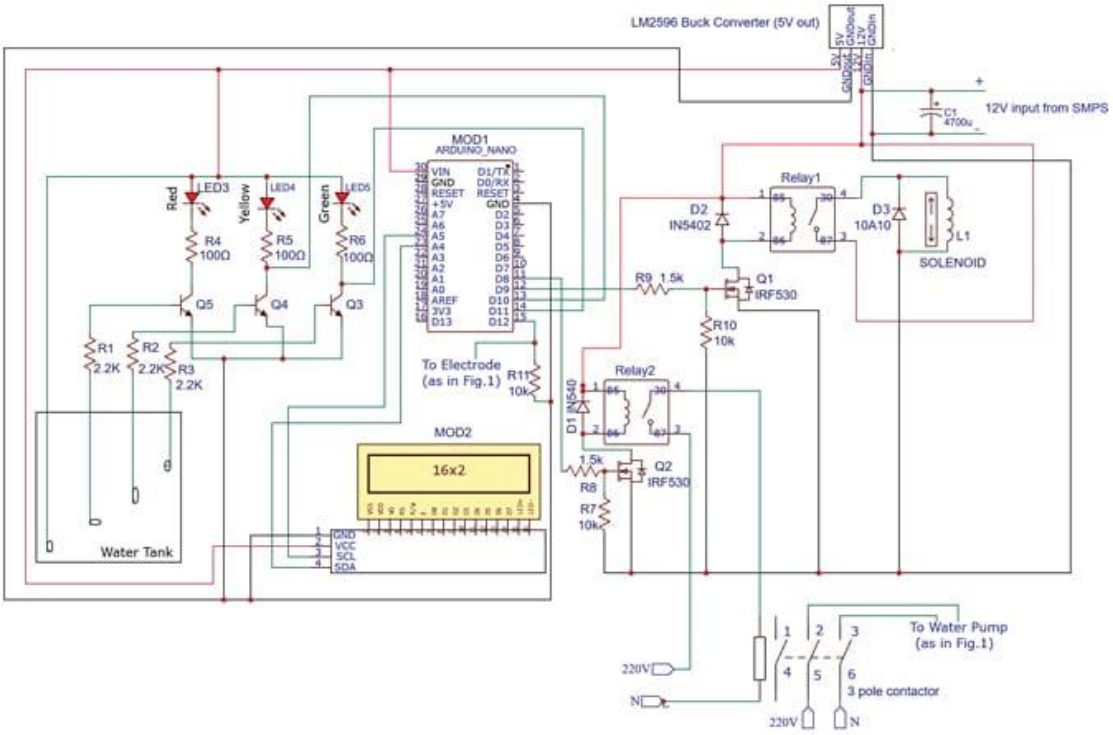


Рис.2.2 – Принципова схема автоматичної системи водопостачання

Наявність міського водопостачання визначається двома електродами, просвердленими в трубі та підключеними до Arduino, що реалізує простий і надійний метод контролю наявності води у трубопроводі. Зазор між електродами діє як перешкода для потоку струму (як опір), причому величина цього опору суттєво залежить від наявності або відсутності водного середовища між електродами.

Коли міське водопостачання доступне, струм починає протікати через електроди, що визначається мікроконтролером в Arduino, який аналізує зміну електричних параметрів між електродами та формує відповідний логічний сигнал для подальшої обробки у системі керування.

Потік води з муніципального водопроводу контролюється за допомогою електромагнітного клапана, який виконує функцію керованого запірного елемента у гідравлічній системі. Крім того, водяний насос використовується для заповнення водою підземного резервуара для зберігання води до резервуара на даху, забезпечуючи транспортування води між різними рівнями системи водопостачання.

Для запобігання зворотному потоку води використовуються два односторонні клапани, що виконують важливу функцію гідравлічного захисту та забезпечують рух води лише в одному напрямку. Два джерела водопостачання об'єднані в один вихід через Т-подібний з'єднувач, що дозволяє інтегрувати декілька потоків води в єдину систему подачі без складних додаткових комутаційних вузлів.

Рівень води визначається трьома біполярними транзисторами BC548, які діють як перемикачі та виконують функцію електронних детекторів рівня. Бази біполярних транзисторів з'єднані з електродами, зануреними в резервуар на різних рівнях (50%, 75% та 100%), через резистори, що забезпечують обмеження струму та стабільну роботу напівпровідникових елементів. Коли рівень води досягає електрода, відповідний транзистор вмикається, і таким чином світлодіод, підключений до транзистора, також вмикається, виконуючи функцію візуальної індикації поточного рівня заповнення резервуара.

2.2 Обґрунтування вибору елементної бази для електричної принципової схеми

Електричні схеми є одним із основних видів технічної документації, що застосовуються під час проєктування, дослідження, виготовлення та експлуатації електронних і електротехнічних пристроїв.

Електрична схема являє собою графічне відображення електричного кола, у якому елементи пристрою (резистори, транзистори, мікроконтролери, датчики, джерела живлення та інші компоненти) подаються у вигляді умовних символів, а їхні з’єднання відображаються лініями провідників.

До основних типів електричних схем належать структурні, функціональні та принципові. Структурна схема відображає загальну побудову системи та взаємодію її основних блоків. Функціональна схема пояснює принцип виконання основних функцій системи та відображає потоки сигналів між окремими вузлами (рис. 2.3.).

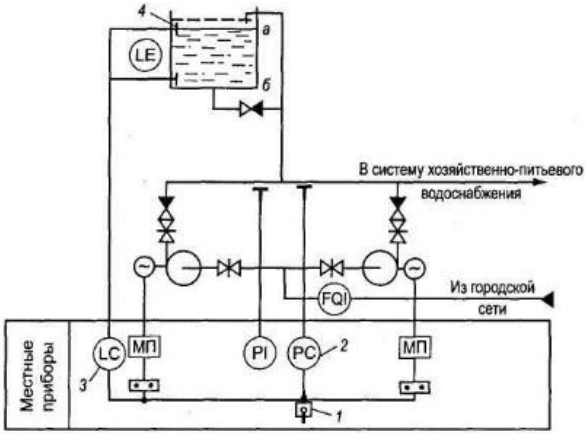


Рисунок 2.3 – Функціональна схема автоматизації системи водопостачання

Найбільш детальною є електрична принципова схема, яка містить повний перелік електронних компонентів та всі електричні з’єднання між ними. На такій схемі використовуються стандартні графічні позначення

елементів, а кожен компонент має буквено-цифрове маркування, що відповідає переліку елементної бази.

Для реалізації цього проєкту нам потрібно використати сукупність електронних компонентів, виконавчих механізмів та допоміжних елементів, які перелічені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Електронні та механічні компоненти пристрою

Компоненти	Кількість
Arduino Nano (MOD1)	1
РК-дисплей 16×2 I2C/IIC (MOD2)	1
12 В, 2 А SMPS	1
LM2596 (вручну налаштовано на 5 В)	1
Електромагнітний клапан (L1)	1
10A, 240V, 2-полюсний контактор	1
IRF530 n-канальний MOSFET (Q1, Q2)	2
BC548 біполярний транзистор (Q3, Q4, Q5)	3
Діод 1N5402 (D1, D2)	2
Діод 10A10 (D3)	1
Зелений, жовтий та червоний світлодіод	1
Резистор 100 Ом (R4, R5, R6)	3
Резистор 1,5 кОм (R8, R9)	2
Резистор 2,2 кОм (R1, R2, R3)	3
Резистор 10 кОм (R7, R10)	2
Роз'єм JST 1×3 для зонда рівня води	1
Роз'єм постійного струму для клапана	1
3-контактний роз'єм 220 В для водяного насоса	1
Розетка змінного струму 220 В, 10 А, 3-контактна, для монтажу, для входу 220 В	1
Вимикач з номіналом 10 А	1
5 В, одне перемикаюче реле	2

16×2 РК-дисплей, підключений до Arduino Nano через I2C, відображає стан водопостачання та водяного насоса.

Соленоїдний клапан керується через реле. Реле керується MOSFET-транзистором IRF530. Вивід затвора MOSFET-транзистора з'єднаний з цифровим виводом D9 Arduino Nano через резистор.

Резистор, підключений між затвором MOSFET-транзистора та землею, діє як підтягувальний резистор. Оборотно-поворотний діод підключено паралельно до котушок реле для захисту MOSFET-транзистора від високої напруги, що створюється колапсуючими магнітними полями.

Водяним насосом можна керувати безпосередньо через реле, але через високий пусковий струм насоса контакти реле можуть легко пошкодитися.

Тому використовується контактор, подібний до реле, але він працює від напруги 220 В змінного струму та має більші та важчі металеві контакти, які не так легко пошкоджуються.

Контактор керується через ту саму систему реле-MOSFET, як описано вище. Вивід затвора MOSFET підключено до цифрового виводу D8 Arduino Nano.

Arduino Nano живиться від входу 5 В, що досягається через понижувальний перетворювач, підключений до джерела живлення 12 В. Конденсатор ємністю 4700 мкФ підключений до джерела живлення 12 В і виконує функцію фільтра низьких частот.

2.3 Розрахунок параметрів основних блоків пристрою

Отже, на підставі початкової принципової електричної схеми встановлення можливості виконання розподілу цієї схеми на окремі функціональні блоки (рис. 2.4.). Кожен такий блок виконує свою функцію при спільній роботі всього комплексу, а взаємодія усіх блоків забезпечує належне функціонування всього встановленого пристрою.

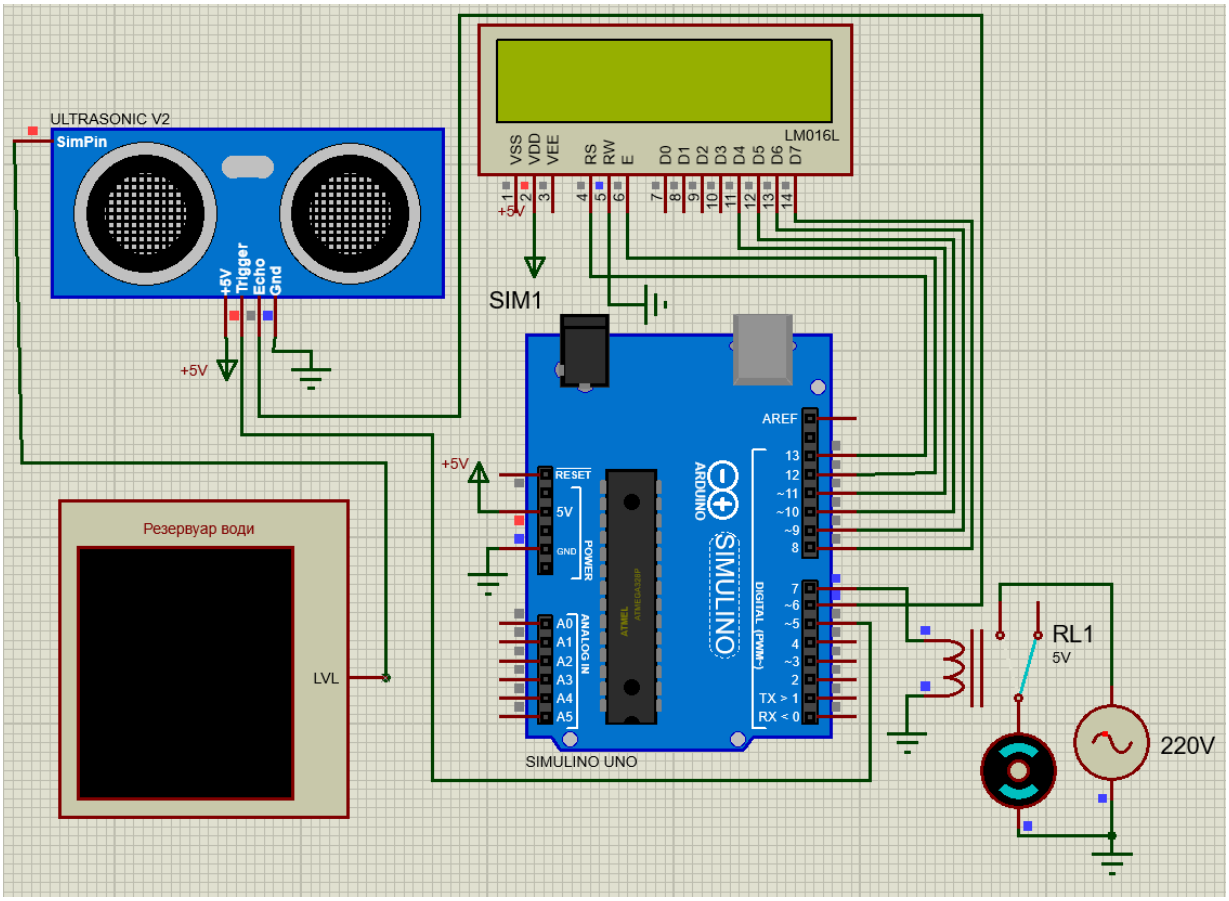


Рисунок 2.4 – Експериментальна схема пристрою

Для кожного блоку можна виконати окремий аналіз принципу роботи, вибір елементної бази та необхідні електричні розрахунки. Відповідно до принципової схеми розроблюваного пристрою можна виділити такі основні функціональні блоки:

1. Блок мікросхеми Arduino UNO
2. Блок вимірювання рівня води
3. Блок керування насосом

2.4 Розподілення блоків плати Arduino UNO

Щоб детальніше дослідити принцип роботи Arduino UNO, доцільно розглянути її внутрішню схему. Це дає змогу зрозуміти, з яких ключових елементів складається плата, а також як ці елементи взаємодіють для забезпечення її функціональних можливостей. Для наочності схема буде поділена на окремі блоки, які представлені на рис. 2.5.

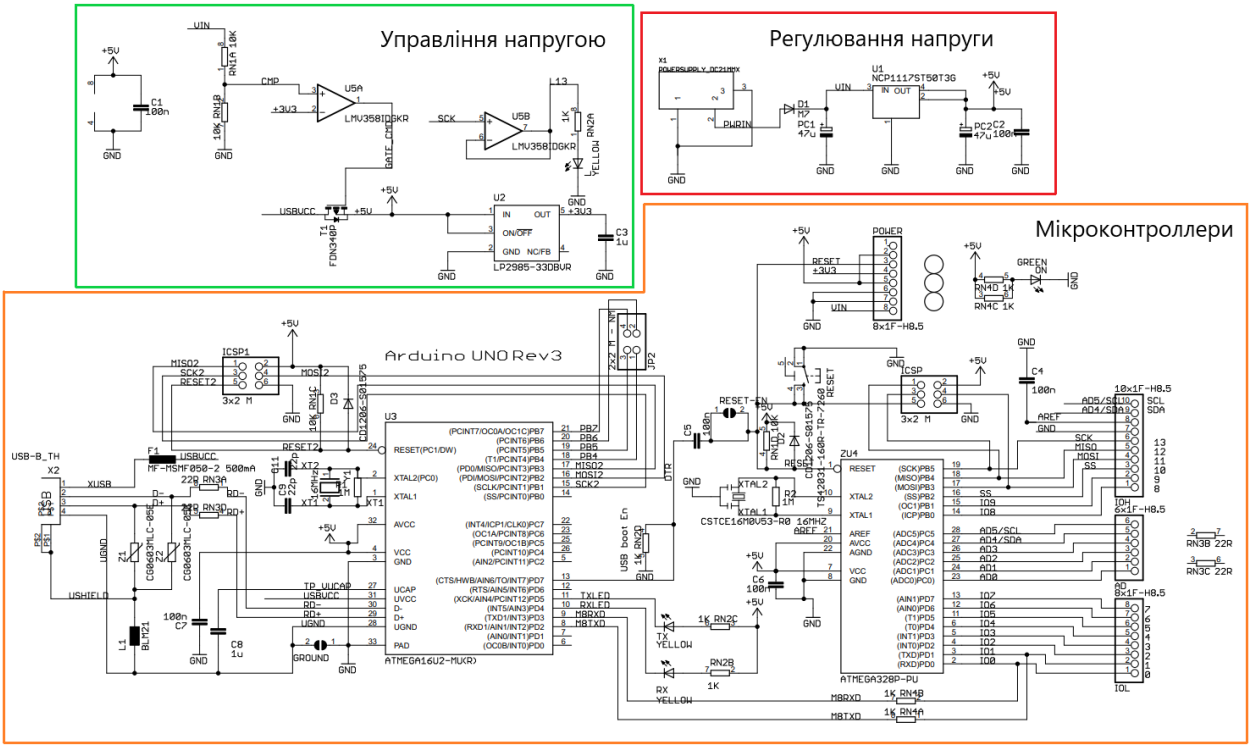


Рисунок 2.5 – Принципова схема управління та регулювання напруги системи

З метою подальшого аналізу планується окремо розрахувати характеристики кожного функціонального блоку плати Arduino UNO, визначивши їхні основні параметри. Такий підхід дозволяє оцінити ефективність роботи окремих модулів, зрозуміти принципи їхньої взаємодії в межах загальної схеми. Аналіз кожного блоку окремо забезпечує цілісне уявлення про роботу плати, допомагає виявити взаємозв’язки між компонентами та створює основу для комплексної оцінки всієї системи.

2.5 Розрахунок блоку регулювання напруги плати Arduino UNO

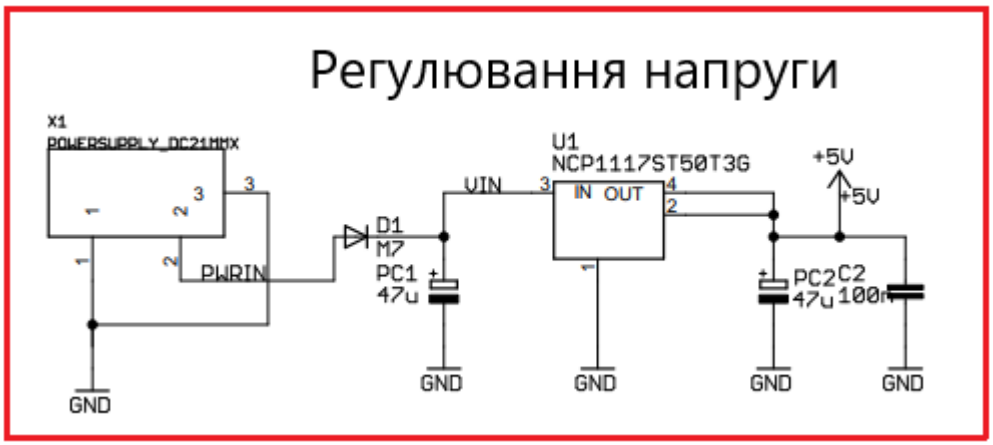


Рисунок 2.6 – Схема блоку регулювання напруги плати Arduino UNO

Розглянутий блок призначений для стабілізації та підготовки напруги живлення плати Arduino UNO. Основні функції цього блоку включають перетворення вхідної напруги (зазвичай 7–12 В від роз’єму X1), стабілізацію вихідної напруги до рівня +5 В, а також фільтрацію електричних перешкод і пульсацій.

Схема блоку включає кілька ключових елементів, кожен із яких виконує певну функцію. Роз’єм X1 забезпечує підключення джерела живлення постійного струму (DC jack).

Діод D1 (M7) виконує захисну функцію, запобігаючи зворотній полярності напруги, що може пошкодити плату. Вхідний конденсатор PC1 (47 µF) забезпечує первинну фільтрацію, згладжуючи пульсації напруги. Основним стабілізуючим елементом є лінійний регулятор U1 (NCP1117ST50T3G), який формує стабільну напругу +5 В для живлення всієї плати та підключених модулів. Додаткові вихідні конденсатори PC2 (47 µF) і C2 (100 нФ) забезпечують додаткову фільтрацію і зменшують залишкові перешкоди на виході.

Після ознайомлення зі складом блоку живлення доцільно перейти до розрахунку його вхідної ланки.

Розрахунок вхідної ланки:

$$U_{IN(min)} = U_{OUT} + U_{drop}$$

За знайденими в даташиті даними до NCP1117 $U_{drop} = 1{,}1$ В

Тоді:

$$U_{IN\,min} = 5 + 1{,}1 = 6{,}1 \text{ В}$$

Найкращий варіант до використання в нашому варіанті буде 7 В, оскільки він відповідає мінімуму з яким є запас. Також у схемі вказано діод, аналогом якого відповідає діод 1N4007, якого призначення захист від зворотнього струму та переполюсування. Відповідно до діоду 1N4007 спад напруги сягає 0,7 В. Отже:

$$U_{IN(U1)} = 7 - 0{,}7 = 6{,}3 \text{ В}$$

До наступного етапу також важливо оцінити та дізнатись, яка потужність розсіювання. Формула розрахунку потужності розсіювання:

$$P = (U_{IN} - U_{OUT}), I$$

Принципово для нашої схеми струм складає 200 мА, що є 0,2 А

$$P = (6.3 - 5) * 0{,}2 = 1.3 * 0{,}2 = 0{,}26 \text{ Вт}$$

Що складає цілком нормальну роботу, при якій стабілізатор не буде сильно грітися. З огляду питання вхідного конденсатору, цілком правильно буде припустити що він подавляє стримує низькочастотні пульсації. Обрана ємність становить 47 uF, але чим більше ємність, тим меньше шум. З вихідним конденсатором питання стає іншим, звернувшись до даташиту NCP1117 ми бачимо наступне:

$$C_{OUT\,min} \geq 10\mu F$$

Що стверджує думку що конденсатор з ємністю 47uF було узято з запасом. Та, якщо оглядати надалі стабілізатор NCP1117, не треба забувати що це лінійний стабілізатор, а отже в нього є внутрішній зворотній зв'язок.

Для таких стабілізаторів діє правило:

$$ESR_{min} < ESR < ESR_{max}$$

Звертаючись до даташиту NCP1117:

$$0{,}3\ \text{Ом} < ESR < 22\ \text{Ом}$$

З цього логічним буде що при малому ESR відбувається самозбудження (осциляція), а при дуже великому ESR погана фільтрація.

Припустимо, що на схемі відображено ESR рівний 0,3 Ом.

Тоді:

$$f_0 = 2\pi * ESR * C1$$

$$C = 47\mu F = 47 * 10^{-6}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi * 0{,}3 * 47 * 10^{-6}} = 11{,}3\ \text{кГц}$$

З огляду на ці властивості, для стабілізаторів типу LDO доцільніше використовувати електролітичні конденсатори. Визначивши f0 ми розуміємо яке значення компенсує фазовий зсув. Також ми маємо деяку проблему з електролітом, зазвичай він погано працює при високих частотах, та має індуктивність, з огляду того що кераміка вирішує це питання, за рахунок імпедансу. Отже, згадавши про LDO, треба також знати що є умова роботи конденсатору до LDO:

$$CIN \geq 10\mu F$$

Також на рахунок пульсацій, розрахунок пульсацій проходить за формулою:

$$\Delta U = \frac{I}{f * C}$$

За приклад візьмемо I = 0,2 А, f = 100 Гц

$$\Delta U = \frac{0{,}2}{100 * 47 * 10^{-6}} = 42\ \text{мВ}$$

Такий результат є доволі гарним дивлячись на всі умови. Але також важливим буде бачити який перехідний процес. При зміні струму:

$$\Delta U = \frac{\Delta I}{C} * \Delta t$$

А отже якщо ΔI = 100 мА, Δt = 1 мС:

$$\Delta U = \frac{0{,}1}{47 * 10^{-6}} * 10^{-6} = 2{,}1\ \text{мВ}$$

При переході просадка сягає малих значень, що дуже добре, а тому наступним пунктом можливо і важливо розглянути полюс вихідного конденсатору, який розраховується за формулою:

$$f_p = \frac{1}{2\pi R_l C}$$

$$R_l = \frac{U}{I} = \frac{5}{0{,}2} = 25 \text{ Ом}$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi * 25 * 47 * 10^{-6}} = 135 \text{ Гц}$$

За даними, домінуючий полюс який формується підсилювачем помилки, має значення від 10 до 100 Гц. Розрахований нами сигнали сягає 135 Гц. Значення ESR рівне 11 кГц.

З аналізу полюсу, після першого полюса, сигнал уходить на -20 дБ/декаду, після другого -40 дБ\декада, що є небезпечною зоною та можлива нестабільність роботи, але нуль повертає фазу до першого значення -20 дБ\декада. Що дає нам зрозуміти що без ESR фаза -180, з ESR фаза сягає -120, фазовий запас складає 60.

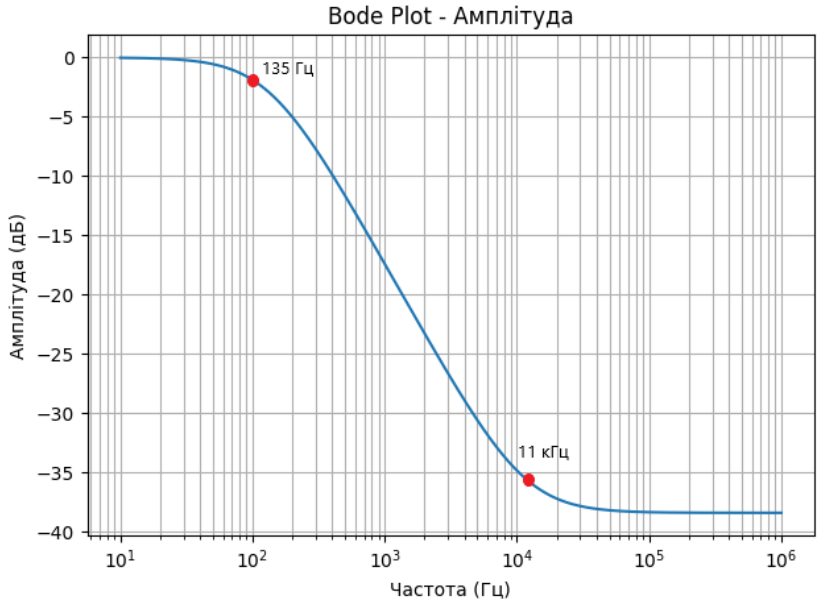


Рисунок 2.7 – Амплітудно-частотна характеристика стабілізатора з урахуванням полюсів та нуля ESR

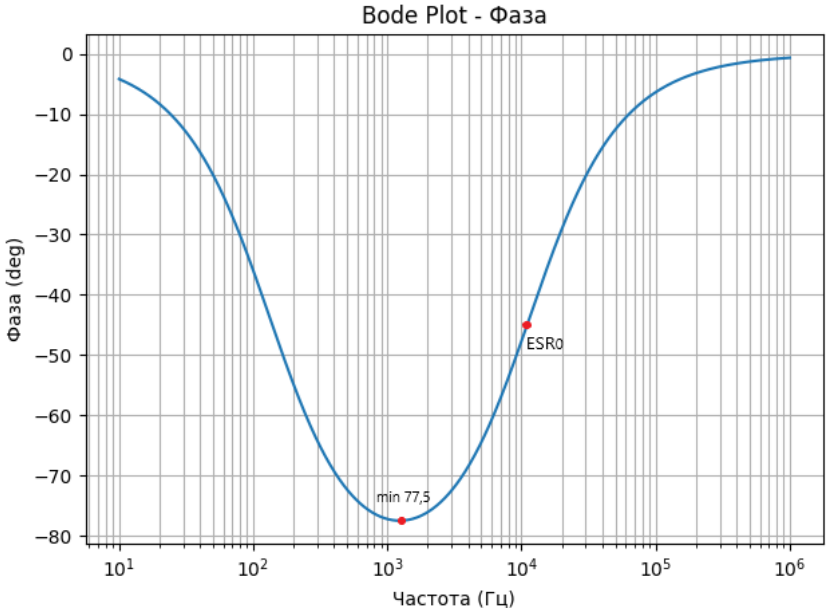


Рисунок 2.8 – Фазо-частотна характеристика стабілізатора з визначенням фазового запасу

З проведеного частотного аналізу, маємо розуміння що стабілізатор напруги NCP1117 є системою з двома полюсами та одним нулем, сформованим еквівалентним послідовним опором вихідного конденсатора. Домінуючий полюс розташований у низькочастотній області, тоді як другий полюс визначається навантаженням і ємністю вихідного конденсатора. Нуль, створений ESR, розташований у області близько 10 кГц і компенсує фазовий зсув, що забезпечує фазовий запас близько 60°, необхідний для стійкої роботи. Використання електролітичного конденсатора є критичним, оскільки занадто малий ESR (як у керамічних конденсаторів) призводить до втрати компенсації та можливого самозбудження системи.

2.6 Розрахунок блоку управління напруги плати Arduino UNO

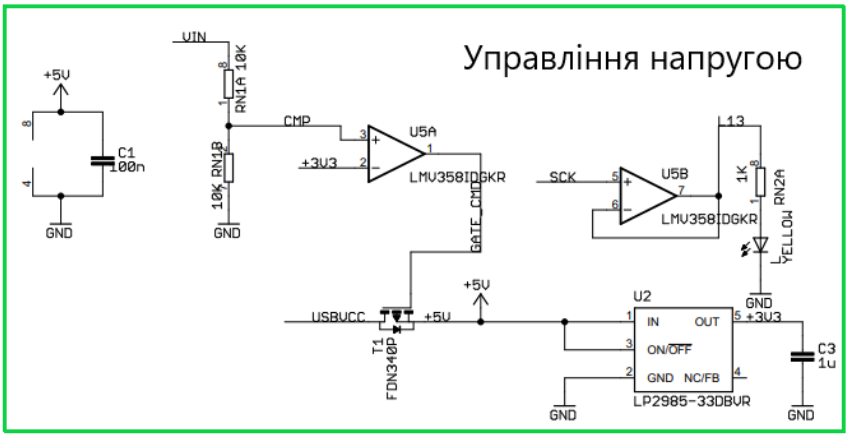


Рисунок 2.9 – Схема блоку управління напруги плати Arduino UNO

Компаратор LMV358 виконує порівняння двох сигналів: напруги з подільника та опорної напруги. На неінвертувальний вхід компаратора подається струм з резистивного подільника:

$$I = \frac{V_{in}}{R_1 + R_2} = \frac{5}{20000} = 2{,}5 \text{ мА}$$

При отриманому струмі врахуємо що він має втрати:

$$P = V * I = 5 * 0.00025 = 1{,}25 \text{ мВт}$$

Важливо також зауважити що це не ідеальний компаратор. За даними деталі ми можемо побачити що максимум напруги Vout=4,2 В.

Додатково відзначимо фільтр конденсатором С1 з ємністю 100 нФ, він має частотні зрізи:

$$f = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi * 10.000 * 100n} = 160 \text{ Гц}$$

Та має частоту реакції:

$$\tau = RC = 10k * 100n = 1 \text{ мс}$$

Надалі перейдемо до розрахунку MOSFET FDN304V, з відомих значень даташиту ми можемо отримати деякі значення з яких ми можемо зробити наступні розрахунти та більш детально розібрати елемент який функціонує в цьому блоці.

Таблиця 2.2 – Основні параметри FDN304V

Параметр	Значення
Vds max	−20 В
Id max	−2.4 А
Rds(on)	35–70 мОм
Vgs(th)	−0.8−2.5 В

Отже за отриманими параметрами логічно почати розрахунок з напруги керування затвором, припустимо коли затвор активний тоді:

$$VGS = 0 - 5 = -5\text{В}$$

А з цього можливо зрозуміти що MOSFET повністю відкритий, а отже працює. Якщо подивитись зі схеми, ми розуміємо що будь-яка підєднанан схема має падіння напруги для її роботи. Отже, розрахунок падіння напруги проводиться наступними формулами:

$$V = I * R$$

Якщо з погляду гіршого варіанту, наприклад:

$$R = 70\ \text{мОм} = 0{,}07\ \text{Ом}$$

Тоді при 200 мА:

$$V = 0{,}2 * 0{,}07 = 0{,}014\ \text{В} = 14\ \text{мВ}$$

Цей результат дає зрозуміти що спад напруги є досить малим, що дає запас на роботу цього елементу. Також важливий елемент це розрахунок тепла яке йде від елементу, який розраховується наступним чином:

$$\Delta T = P * R = 0{,}0175 * 200 = 3{,}5\ \text{С}$$

Отже, знайдена температура дає нам розуміння що схема не має перегріву. Проведений розрахунок показав, що при струмі навантаження до 500 мА падіння напруги становить не більше 35 мВ. Потужність розсіювання не перевищує 17.5 мВт, що призводить до підвищення температури не більше 3.5 °C.

2.7 Розрахунок блоку мікроконтролерів плати Arduino UNO

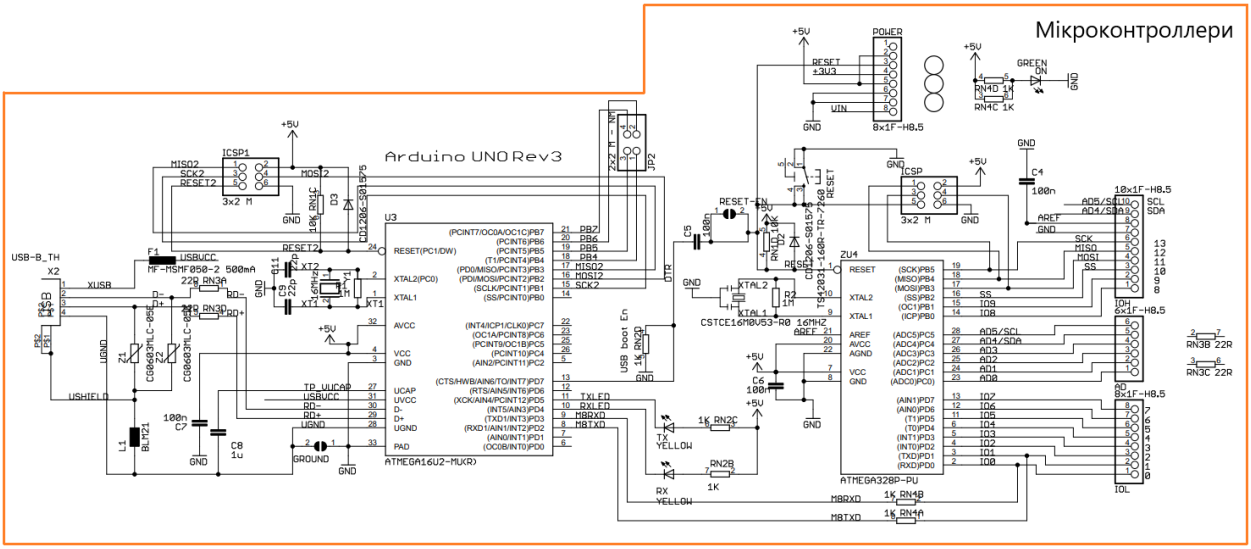


Рисунок 2.10 – Схема блоку мікроконтролерів плати Arduino UNO

У платі Arduino UNO Rev3 використовується комбінована система живлення, яка забезпечує стабільну роботу цифрової та аналогової частин пристрою. Формування напруги живлення здійснюється за допомогою лінійного стабілізатора напруги типу NCP1117-5.0, а також джерела живлення від USB-інтерфейсу. Перемикання між джерелами живлення реалізується за допомогою MOSFET-ключа. В результаті попереднього розрахунку блоку живлення отримано стабілізовану напругу живлення

$$VCC = 5\ B$$

Отримане значення відповідає технічним вимогам мікроконтролерів та забезпечує стабільну роботу всієї системи.

У схемі плати використано два мікроконтролери — ATmega328P-PU та ATmega16U2-MU. Обидва мікроконтролери працюють від стабілізованої напруги +5 В. Для мікроконтролера ATmega328P передбачено кілька виводів живлення: VCC для цифрової частини, AVCC для аналогової частини, GND — загальний провід та AREF — опорна напруга аналогово-цифрового перетворювача. Особливу увагу приділено живленню AVCC, яке відповідно до рекомендацій виробника повинно бути обов’язково підключене навіть у випадку, якщо аналогова частина не використовується.

У досліджуваній схемі живлення AVCC підключене до шини +5 В через фільтруючий елемент, а між виводами AVCC та GND встановлено конденсатор ємністю 100 нФ. Така схема дозволяє забезпечити стабільне живлення аналогово-цифрового перетворювача та зменшити рівень високочастотних шумів.

Згідно з рекомендаціями даташиту мікроконтролера ATmega328P, біля кожного виводу живлення VCC та AVCC необхідно встановлювати decoupling-конденсатори ємністю не менше 0,1 мкФ. Ці конденсатори забезпечують фільтрацію високочастотних перешкод та стабілізацію напруги живлення. Імпеданс конденсатора визначається за формулою

$$Z_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

Проведемо розрахунок для конденсатора ємністю 100 нФ на частоті 1 МГц

$$Z_{100nF} = \frac{1}{2\pi * 10^6 * 100 * 10^{-9}} = 1{,}6 \text{ Ом}$$

Отримане значення свідчить про низький імпеданс конденсатора на високих частотах, що забезпечує ефективне пригнічення шумів цифрової частини мікроконтролера.

Для оцінки стабільності живлення визначимо падіння напруги на еквівалентному послідовному опорі конденсатора. Падіння напруги визначається за формулою

$$\Delta V = I * ESR$$

При струмі споживання мікроконтролера

$$I = 30 \text{ мА} = 0.03 \text{ А}$$

та еквівалентному послідовному опорі

$$ESR = 0{,}5 \text{ Ом}$$

падіння напруги становитиме

$$\Delta V = 0{,}03 * 0{,}5 = 0{,}015 \text{ В}$$

Отримане значення падіння напруги становить менше 0,02 В, що є

допустимим та не впливає на стабільність роботи мікроконтролера.

Другий мікроконтролер ATmega16U2 використовується для реалізації USB-інтерфейсу плати Arduino UNO. Згідно з технічними характеристиками, при живленні 5 В та активному USB-інтерфейсі струм споживання мікроконтролера становить приблизно 40 мА. Додатково струм споживається USB-UART інтерфейсом, який становить

$$I_{USB} = 20 - 30\text{мА}$$

Загальний струм споживання визначається як

$$I_{total} = I_{MCU} + I_{USB} = 40 + 30 = 70 \text{ мА}$$

Отримане значення відповідає максимальному режиму роботи пристрою.

Живлення мікроконтролерів здійснюється від стабілізатора напруги +5 В на базі мікросхеми NCP1117. Максимальний струм стабілізатора становить

$$I_{\text{макс}} = 800 \text{ мА}$$

Порівнюючи отримані значення, можна визначити запас по струму

$$I_{\text{заг}} = 70 \text{ мА} < 800 \text{ мА}$$

Таким чином, джерело живлення має значний запас по струму, що забезпечує стабільну роботу пристрою навіть у пікових режимах навантаження.

Для забезпечення стабільної роботи мікроконтролерів у платі Arduino UNO використовується кварцовий резонатор із частотою 16 МГц. Кварцовий генератор застосовується для обох мікроконтролерів — ATmega328P-PU, який є основним керуючим елементом, та ATmega16U2-MU, що використовується для реалізації USB-UART інтерфейсу. Використання кварцового резонатора дозволяє забезпечити стабільну частоту роботи, підвищену точність таймерів, а також коректну роботу інтерфейсів UART, SPI та інших периферійних модулів.

Підключення кварцового резонатора до мікроконтролера ATmega328P виконується за типовою схемою, рекомендованою виробником. Кварцовий резонатор підключається між виводами XTAL1 та XTAL2, а до кожного

виводу підключаються навантажувальні конденсатори, які з'єднані із загальним проводом. Номінали конденсаторів визначаються відповідно до параметрів кварцового резонатора.

Вибір навантажувальних конденсаторів здійснюється за формулою

$$Cs = 2 * (C_L - C_{stray})$$

Для кварцового резонатора з частотою 16 МГц типове значення навантажувальної ємності становить

$$CL = 20 \text{ пФ}$$

Паразитна ємність друкованої плати та входів мікроконтролера приймається

$$C_{stray} = 5 \text{ пФ}$$

Підставивши значення у формулу, отримаємо

$$C_s = 2 * (20 - 5) = 30 \text{ пФ}$$

Отримане значення ємності становить 30 пФ. Однак у практичних схемах використовуються стандартні номінали, тому обираються конденсатори ємністю 22 пФ, що відповідає рекомендаціям виробників та широко застосовується у платах Arduino UNO.

Для оцінки параметрів кварцового генератора можна виконати розрахунок резонансної частоти за спрощеною формулою

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_t}}$$

Сумарна ємність визначається як

$$C_t = C_s + C_{str} = 22 + 5 = 27$$

Приймаємо еквівалентну індуктивність кварцового резонатора

$$L = 25 \text{ мГн}$$

Підставимо значення у формулу

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{25 * 10^{-3} * 27 * 10^{-12}}}$$

Обчислимо добуток

$$L * C_{tot} = 25 * 10^{-3} * 27 * 10^{-12} = 6{,}75 * 10^{-13}$$

Обчислимо корінь

$$\sqrt{6{,}75 * 10^{-13}} = 2{,}598 * 10^{-6}$$

Підставимо у формулу

$$f_r = \frac{1}{2\pi * 2{,}598 * 10^{-6}} = 61{,}3 \text{ кГц}$$

Отримане значення значно відрізняється від реальної частоти кварцового резонатора. Це пояснюється тим, що реальна частота кварцу визначається його внутрішньою механічною структурою, а не тільки параметрами еквівалентної електричної схеми. Тому фактична частота генерації приймається рівною номінальному значенню кварцового резонатора:

$$f = 16 \text{ МГц}$$

Для забезпечення стабільного запуску генератора необхідно оцінити час встановлення коливань. Час запуску визначається за формулою

$$t_{stup} = 0.693 * R * C$$

При використанні конденсаторів 22 пФ отримуємо час запуску приблизно

$$t_{stup} = 1 \text{ мс}$$

Отримане значення знаходиться у межах, рекомендованих виробником мікроконтролера ATmega328P, що становлять від 16 мкс до 16 мс, тому запуск генератора відбувається стабільно.

Для мікроконтролера ATmega16U2 використовується аналогічна схема підключення кварцового резонатора з частотою 16 МГц та навантажувальними конденсаторами 22 пФ. Така уніфікація спрощує проектування та забезпечує стабільну роботу USB-інтерфейсу.

Точність кварцового резонатора визначається параметрами виробника та становить приблизно ±30 ppm. Для частоти 16 МГц відхилення становитиме

$$\Delta f = 16 * 10^6 * 30 * 10^{-6} = 480 \text{ Гц}$$

Отримане відхилення є незначним і не впливає на роботу цифрових інтерфейсів. Для швидкості UART 115200 бод відносна похибка становить

$$\frac{\Delta f}{f} = 30\ ppm = 0{,}003\ \%$$

Для забезпечення стабільного запуску мікроконтролерів у платі Arduino UNO Rev3 використовується коло апаратного скидання (Reset), яке застосовується для мікроконтролерів ATmega328P-PU та ATmega16U2-MU.

Типова схема Reset-ланцюга складається з підтягуючого резистора, конденсатора та кнопки ручного скидання. Підтягуючий резистор підключається між лінією живлення +5 В та входом RESET, а конденсатор підключається між входом RESET та загальним проводом. Кнопка RESET підключається паралельно конденсатору та забезпечує ручне скидання мікроконтролера.

У досліджуваній схемі використовуються стандартні значення елементів:

$$R_{pullup} = 10\ \text{кОм}$$

$$C_{reset} = 100\ \text{нФ}$$

Живлення мікроконтролерів становить

$$V_{CC} = 5\ \text{В}$$

Після подачі живлення напруга на вході RESET змінюється за експоненційним законом, який визначається формулою RC-ланцюга:

$$V(t) = V_{CC} * (1 - e^{-t/(RC)})$$

Мікроконтролер виходить зі стану скидання після досягнення рівня логічної одиниці на вході RESET. Для мікроконтролерів сімейства AVR порогове значення становить приблизно

$$V_{IH} = 0.6 * V_{CC}$$

Підставляючи значення напруги живлення, отримаємо

$$V_{IH} = 0.6 * 5 = 3.0\ \text{В}$$

Визначимо час, за який напруга на вході RESET досягне цього значення. Для цього прирівняємо вираз до порогового рівня:

$$0.6V_{CC} = V_{CC}(1 - e^{-t/(RC)})$$

Спростивши рівняння, отримаємо

$$0.6 = 1 - e^{-t/(RC)}$$

$$e^{-t/(RC)} = 0.4$$

$$t_{RESET} = -RC * \ln(0.4)$$

Підставимо значення елементів:

$$R = 10 \text{ кОм} = 10 * 10^3 \text{ Ом}$$

$$C = 100 \text{ нФ} = 100 * 10^{-9} \text{ Ф}$$

Обчислимо добуток:

$$R * C = 10 * 10^3 * 100 * 10^{-9}$$

$$R * C = 0.001\ c = 1 \text{ мс}$$

Враховуючи значення

$$\ln(0.4) = -0.9163$$

Отримаємо

$$t_{RESET} = 1 \text{ мс} * 0.9163$$

$$t_{RESET} = 0.92 \text{ мс}$$

Отриманий час Power-On Reset становить приблизно 0.92 мс, що перевищує мінімальний час, рекомендований виробником мікроконтролера ATmega328P, який становить приблизно 62 мкс. Таким чином, забезпечується достатній запас для стабілізації напруги живлення.

Для мікроконтролера ATmega16U2 використовується аналогічна схема з такими самими параметрами. Тому час запуску також становить

$$t_{RESET} = 0.92 \text{ мс}$$

Отримане значення відповідає вимогам даташиту та забезпечує стабільний запуск USB-контролера.

При натисканні кнопки RESET конденсатор швидко розряджається на землю, внаслідок чого напруга на вході RESET зменшується до нуля, і мікроконтролер переходить у стан скидання. Після відпускання кнопки конденсатор починає заряджатися через резистор, і після досягнення порогового рівня відбувається повторний запуск мікроконтролера.

Визначимо струм через підтягуючий резистор під час подачі живлення. Максимальний струм виникає при початковому значенні напруги на вході

RESET, що дорівнює нулю:

$$I_{max} = \frac{V_{CC}}{R}$$

Підставляючи значення, отримаємо

$$I_{max} = \frac{5}{10 * 10^3}$$

$$I_{max} = 0.5 \text{ мА}$$

Отримане значення струму є незначним та не перевищує допустимі параметри мікроконтролера.

При необхідності час скидання можна змінювати шляхом зміни ємності конденсатора. Наприклад, при використанні конденсатора ємністю 220 нФ час запуску становитиме

$$t_{RESET} = 2 \text{ мс}$$

що може застосовуватися для більш повільних джерел живлення.

У блоці мікроконтролерів плати Arduino UNO Rev3 використовуються резистори та конденсатори, що забезпечують стабільну роботу цифрової та аналогової частини пристрою, формування логічних рівнів, обмеження струмів та фільтрацію перешкод. До основних типів резисторів належать підтягуючі резистори RESET, I2C та GPIO, а також резистори обмеження струму світлодіодів. Конденсатори використовуються для фільтрації живлення, формування сигналу скидання та забезпечення стабільної роботи кварцових генераторів.

У колі скидання мікроконтролерів використовується підтягуючий резистор номіналом 10 кОм та конденсатор ємністю 100 нФ. При подачі живлення струм через підтягуючий резистор визначається за законом Ома

$$I = \frac{V}{R}$$

При напрузі живлення 5 В отримуємо

$$I = \frac{5}{10 * 10^3}$$

$$I = 0.5 \text{ мА}$$

Отримане значення струму є безпечним для входу мікроконтролера та не перевищує допустимих значень.

Час підйому сигналу RESET визначається постійною часу RC-ланцюга

$$t = -R * C * \ln(0.4)$$

Підставляючи значення елементів

$$t = -10 * 10^3 * 100 * 10^{-9} * \ln(0.4)$$

$$t = 0.92 \text{ мс}$$

Отриманий час забезпечує стабільний запуск мікроконтролерів при подачі живлення.

Для інтерфейсу I2C використовуються підтягуючі резистори номіналом 4.7 кОм. Струм при логічному нулі визначається за формулою

$$I_{LOW} = \frac{V}{R}$$

$$I_{LOW} = \frac{5}{4.7 * 10^3}$$

$$I_{LOW} = 1.06 \text{ мА}$$

Потужність, що розсіюється на резисторі, визначається за формулою

$$P = I^2 * R$$

$$P = (1.06 * 10^{-3})^2 * 4.7 * 10^3$$

$$P = 5.3 \text{ мВт}$$

Отримане значення значно менше допустимої потужності стандартного резистора 0.125–0.25 Вт, що забезпечує значний запас по потужності.

Для індикації роботи плати використовуються світлодіоди з обмежувальними резисторами номіналом 1 кОм. При прямому падінні напруги на світлодіоді приблизно 2 В струм визначається за формулою

$$I = \frac{V_{CC} - V_f}{R}$$

$$I = \frac{5 - 2}{1000}$$

$$I = 3 \text{ мА}$$

Потужність, що розсіюється на резисторі

$$P = I * V_R$$

$$P = 0.003 * 3$$

$$P = 9 \text{ мВт}$$

Отримане значення забезпечує безпечну роботу світлодіодів та мінімальне споживання струму.

Підтягуючі резистори GPIO номіналом 10 кОм використовуються для формування стабільних логічних рівнів. Струм через резистор становить приблизно

$$I = 0.5 \text{ мА}$$

Таке значення є безпечним для входів мікроконтролера та не створює додаткового навантаження.

Для стабілізації живлення мікроконтролерів використовуються decoupling-конденсатори ємністю 0.1 мкФ, підключені до виводів VCC, AVCC та UVCC. Типове значення еквівалентного послідовного опору конденсаторів становить

$$ESR = 0.3 - 0.5 \text{ Ом}$$

Частота ефективного пригнічення шумів визначається за формулою

$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

Приймаючи значення

$$R = 0.5 \text{ Ом}$$

$$C = 0.1 \text{ мкФ}$$

отримаємо

$$f = \frac{1}{2\pi * 0.5 * 0.1 * 10^{-6}}$$

$$f = 3.18 \text{ МГц}$$

Таким чином, конденсатори ефективно пригнічують високочастотні перешкоди понад 3 МГц.

2.8 Розрахунок блоку вимірювання води

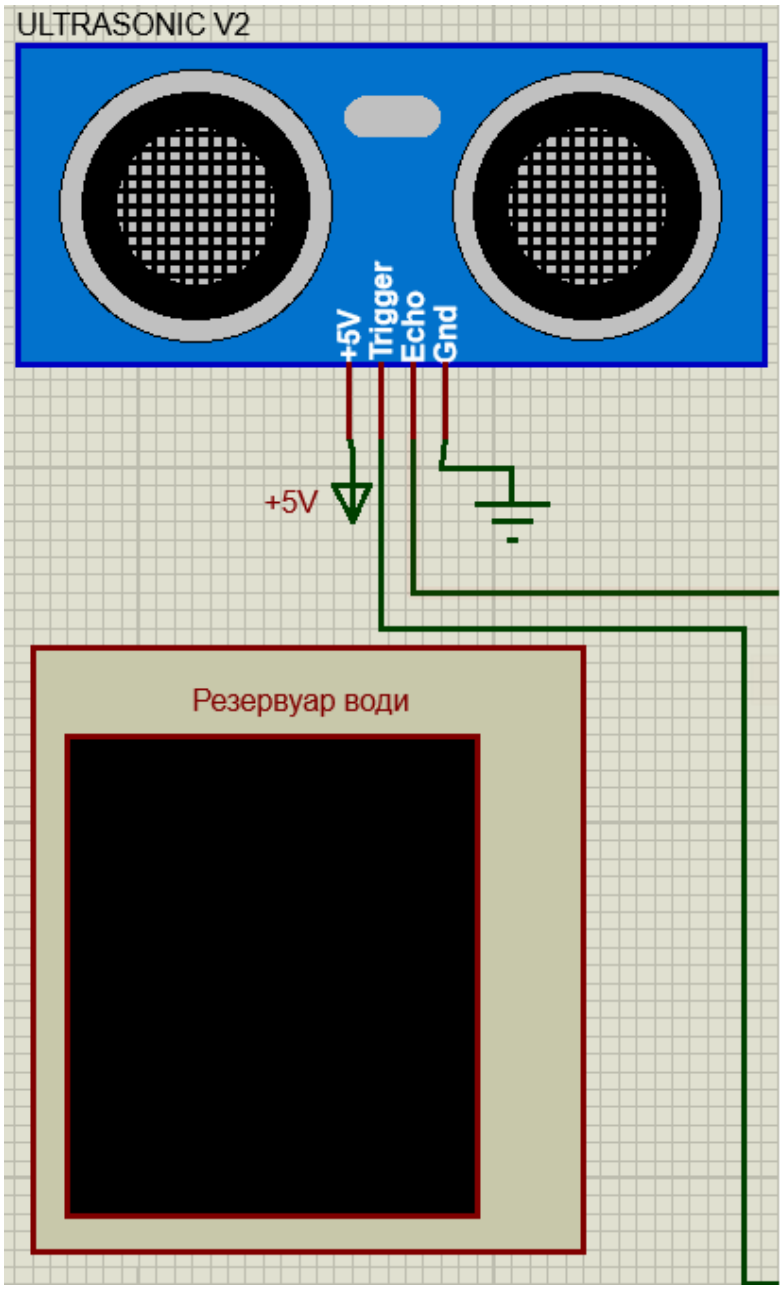


Рисунок 2.11 – Експериментальний блок вимірювання води

Основними елементами даного блоку є резервуар з водою та ультразвуковий датчик відстані HC-SR04, який виконує функцію ехолокації.

Для розуміння роботи системи, формування та обробки сигналів, що передаються до Arduino, необхідно розглянути внутрішню структуру та принципову схему роботи ультразвукового датчика.

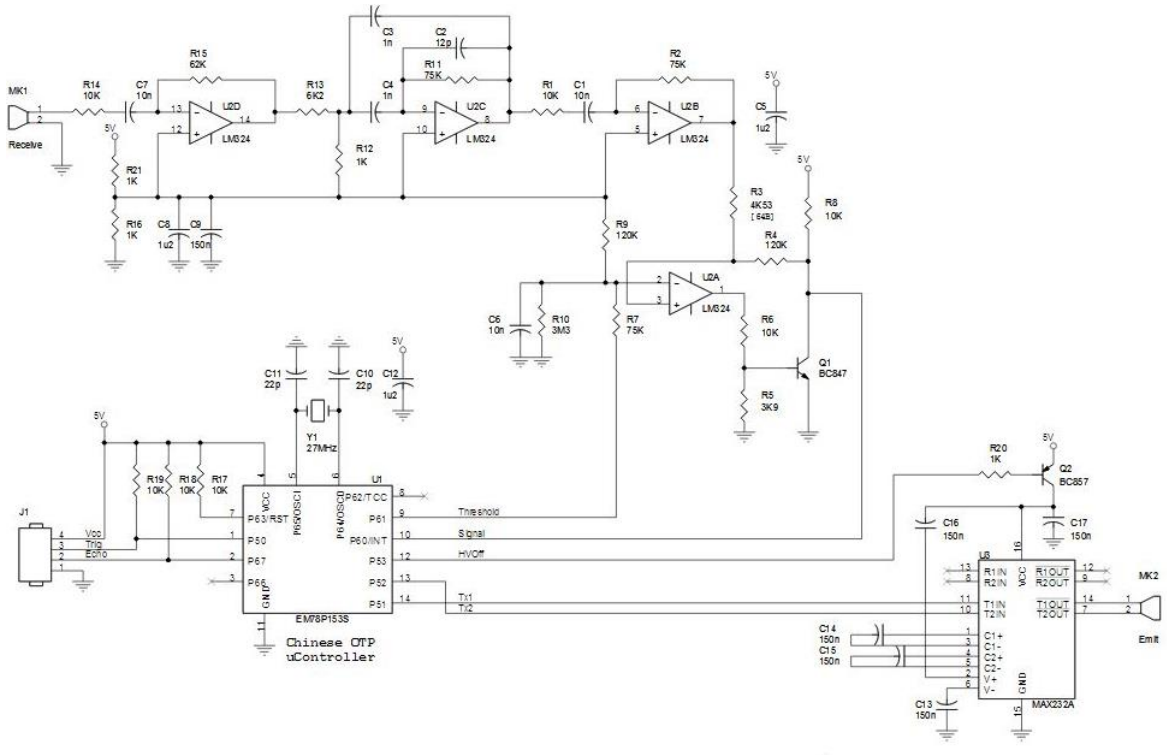


Рисунок 2.12 – Схема принципова електрична HC-SR04

Детальний розгляд схеми дозволяє представити пристрій у вигляді сукупності окремих функціональних блоків, кожен з яких виконує визначену роль у формуванні, прийомі та обробці ультразвукового сигналу. Такий підхід значно спрощує подальший аналіз роботи системи та проведення необхідних розрахунків.

Таким чином, загальна структура Ultrasonic Echo Locator v2 включає наступні основні блоки:

1. Приймальний ультразвуковий датчик
2. Перший каскад посилення
3. Другий каскад посилення
4. Детектор ехосигналу
5. Пороговий компаратор
6. Формувач сигналу для MCU
7. Передавальний ультразвуковий каскад
8. Мікроконтролер управління

2.9 Розрахунок блоку приймального ультразвукового датчику

У досліджуваній схемі приймального ультразвукового датчика використано ультразвуковий приймач MK1 операційний підсилювач LM324 та елементи R14, C7, R15, R16, R21, C8, C9. Перш ніж здійснювати підсилення сигналу необхідно сформувати високочастотний фільтр для відсікання низькочастотних шумів та забезпечення пропускання основного сигналу датчика. Для цього використано конденсатор C7 та резистор R14 Частота зрізу фільтра визначається формулою

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

де R опір резистора C ємність конденсатора

Підставляючи значення R = 10 кОм та C = 1 нФ отримуємо

$$f_c = \frac{1}{2\pi * 10000 * 1 * 10^{-9}} = 15{,}9\text{кГц}$$

Це забезпечує проходження сигналу частотою 40 кГц та пригнічення низькочастотних шумів. Для перевірки ефективності фільтра визначаємо реактивний опір конденсатора за формулою

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC}$$

При частоті 40 кГц та C7 = 1 нФ реактивний опір складає

$$X_c = 3{,}98\text{кОм}$$

Значення Xc при низьких частотах збільшується до 159 кОм що підтверджує пригнічення низькочастотних сигналів. Вхідний опір підсилювача визначається сумою резистора R14 та реактивного опору конденсатора

$$Z_{\text{in}} = R_{14} + X_c = 10\text{ кОм} + 3{,}98\text{ кОм} = 13{,}98\text{ кОм}$$

Після фільтрації сигнал подається на неінвертуючий підсилювач U2D коефіцієнт підсилення якого визначається співвідношенням резисторів

$$K = 1 + \frac{R_{15}}{R_{14}} = 1 + \frac{62\text{ кОм}}{10\text{ кОм}} = 7{,}2$$

Вхідний сигнал від датчика 5 мВ після підсилення стає 36 мВ а максимальний сигнал 50 мВ збільшується до 360 мВ. Для забезпечення правильного рівня зміщення використовується подільник напруги R16 та R21 напруга зміщення розраховується формулою

$$V_{\text{bias}} = \frac{R_{16}}{R_{16} + R_{21}} * V_{cc} = \frac{1\ \text{кОм}}{1 + 1\ \text{кОм}} * 5\ \text{В} = 2{,}5\ \text{В}$$

Струм через подільник визначається за законом Ома

$$I = \frac{V_{cc}}{R_{16} + R_{21}} = \frac{5\ \text{В}}{2\ \text{кОм}} = 2{,}5\ \text{мА}$$

Враховуючи струм розраховуємо потужність резисторів

$$P = I^2R = (2{,}5\ \text{мА})^2 * 1\ \text{кОм} = 6{,}25\ \text{мВт}$$

Для зменшення постійної складової сигналу застосовано фільтр зміщення на C8 та C9. Частота зрізу фільтра визначається за тією ж формулою 1/2πRC Для C8 = 1 μФ та R = 1 кОм частота зрізу складає 159 Гц для C9 = 150 нФ отримуємо 1061 Гц

Смуга пропускання підсилювача після підсилення сигналу визначається співвідношенням Gain Bandwidth Product до коефіцієнта підсилення LM324 має GBW = 1 МГц отже після підсилення

$$BW = \frac{1\ \text{МГц}}{7{,}2} = 138\ \text{кГц}$$

Перевірка швидкодії підсилювача здійснюється порівнянням Slew rate сигналу з номінальним SR LM324 сигнал амплітудою 0.36 В та частотою 40 кГц формує

$$SR = 2\pi fV = 2\pi * 40000 * 0.36 = 0{,}09\ \text{В/мкс}$$

що значно менше граничного значення 0.5 В/μс і забезпечує стабільну роботу

2.10 Розрахунок блоку першого каскаду підсилення

У другому каскаді підсилення виконується додаткове підсилення сигналу ультразвукового датчика а також формування активного смугового фільтра який дозволяє виділити сигнал частотою 40 кГц та пригнітити шумові складові. Для реалізації цього каскаду використано операційний підсилювач LM324 та елементи R13 R12 R11 C3 C4 C2

Операційний підсилювач U2C включений за схемою інвертуючого підсилювача з частотно залежним зворотним зв'язком що дозволяє одночасно виконати підсилення сигналу та формування смугового фільтра.

Коефіцієнт підсилення інвертуючого підсилювача визначається співвідношенням резисторів зворотного зв'язку та вхідного резистора

$$K = \frac{R_{11}}{R_{13}}$$

Підставляючи номінали елементів R11 = 75 кОм та R13 = 6.2 кОм отримуємо

$$K = \frac{75\,000}{6\,200} = 12.09$$

Отримане значення показує що другий каскад підсилює сигнал приблизно у 12 разів. Для визначення загального підсилення системи необхідно врахувати підсилення першого каскаду яке становить 7.2 Загальне підсилення визначається добутком коефіцієнтів підсилення

$$K_{total} = K_1 * K_2$$

$$K_{total} = 7.2 * 12.09 = 87$$

Отримане значення означає що сигнал ультразвукового датчика підсилюється приблизно у 87 разів. Мінімальний сигнал 5 мВ після підсилення становитиме

$$V_{out} = 5\text{ мВ} * 87 = 435\text{ мВ}$$

Максимальний сигнал 50 мВ після підсилення становитиме

$$V_{out} = 50\text{ мВ} * 87 = 4.35\text{ В}$$

Для пригнічення низькочастотних шумів на вході підсилювача використовується високочастотний фільтр сформований елементами C4 та R13. Частота зрізу такого фільтра визначається за формулою

$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

Підставляючи значення R = 6.2 кОм та C = 1 нФ отримуємо

$$f = \frac{1}{2\pi * 6200 * 1 * 10^{-9}} = 25.7 \text{ кГц}$$

Отримане значення показує що частоти нижче 25.7 кГц пригнічуються а сигнал 40 кГц проходить без ослаблення. Частота зрізу визначається аналогічною формулою

$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

Підставляючи R = 75 кОм та C = 1 нФ отримуємо

$$f = \frac{1}{2\pi * 75000 * 1 * 10^{-9}} = 2.12 \text{ кГц}$$

Оскільки цей фільтр знаходиться у колі зворотного зв'язку він формує активний смуговий фільтр. Для визначення верхньої частоти смуги пропускання використовується конденсатор C2 ємністю 12 пФ. Верхня частота визначається за формулою

$$f_{high} = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$f_{high} = \frac{1}{2\pi * 75000 * 12 * 10^{-12}} = 176 \text{ кГц}$$

Нижня частота становить 25.7 кГц а верхня частота 176 кГц. Смуга пропускання визначається як різниця між верхньою та нижньою частотою

$$BW = f_{high} - f_{low}$$

$$BW = 176 \text{ кГц} - 25.7 \text{ кГц} = 150 \text{ кГц}$$

Оскільки робоча частота ультразвукового сигналу 40 кГц знаходиться в межах смуги пропускання 25.7 кГц — 176 кГц сигнал проходить без спотворень. Для перевірки роботи фільтра визначаємо реактивний опір конденсаторів при частоті 40 кГц

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}$$

Для C4 та C3 при 1 нФ

$$X_c = 3.98 \text{ кОм}$$

Для конденсатора C2 = 12 пФ

$$X_c = 331 \text{ кОм}$$

Отримані значення підтверджують формування смугового фільтра Для оцінки впливу вхідного струму операційного підсилювача враховується струм зміщення LM324 який становить 45 нА Падіння напруги визначається за законом Ома

$$V = I * R$$

$$V = 45 \text{ нА} * 75 \text{ кОм} = 3.37 \text{ мВ}$$

Для перевірки смуги пропускання операційного підсилювача використовується параметр Gain Bandwidth Product який для LM324 становить 1 МГц Смуга пропускання після підсилення визначається як

$$BW = \frac{1 \text{ МГц}}{12.09} = 83 \text{ кГц}$$

Оскільки робоча частота 40 кГц менша за 83 кГц підсилювач працює стабільно

Для перевірки швидкодії операційного підсилювача використовується параметр Slew Rate Для сигналу амплітудою 4.35 В та частотою 40 кГц необхідний Slew Rate визначається за формулою

$$SR = 2\pi f V$$

$$SR = 2\pi * 40000 * 4.35 = 1.09 \text{ В/мкс}$$

Максимальний Slew Rate LM324 становить 0.5 В/мкс що менше розрахованого значення. Отже підсилювач працює на межі швидкодії що пояснює обмеження амплітуди та стабілізацію сигналу

2.11 Розрахунок блоку другого каскаду підсилення

У третьому каскаді підсилення виконується додаткове підсилення сигналу після попередніх каскадів а також формування смугового фільтра для стабілізації сигналу перед детектором. Для реалізації даного каскаду використано операційний підсилювач LM324 та елементи R1 C1 R2 C5

Операційний підсилювач включений за схемою неінвертуючого підсилювача що дозволяє забезпечити високий вхідний опір та стабільну роботу наступних каскадів. Коефіцієнт підсилення неінвертуючого підсилювача визначається за формулою

$$K = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Підставляючи номінальні значення R2 = 75 кОм та R1 = 10 кОм отримуємо

$$K = 1 + \frac{75}{10} = 8.5$$

Отримане значення показує що третій каскад підсилює сигнал приблизно у 8.5 разів. Для визначення загального підсилення системи враховується підсилення попередніх каскадів яке становить 7.2 та 12.1 відповідно. Загальне підсилення визначається як добуток коефіцієнтів підсилення

$$K_{total} = K_1 * K_2 * K_3 = 7.2 * 12.1 * 8.5 = 740$$

Отримане значення показує що сигнал ультразвукового датчика підсилюється приблизно у 740 разів. Мінімальний сигнал 5 мВ після підсилення становитиме

$$V_{out} = 5 \text{ мВ} * 740 = 3.7 \text{ В}$$

Максимальний сигнал 50 мВ після підсилення становитиме

$$V_{out} = 50 \text{ мВ} * 740 = 37 \text{ В}$$

Оскільки операційний підсилювач живиться від напруги 5 В реальний вихідний сигнал обмежується рівнем живлення та знаходиться в межах 0–5 В

Для формування нижньої межі смуги пропускання використовується високочастотний фільтр побудований на елементах C1 та R1. Частота зрізу визначається за формулою

$$f_{low} = \frac{1}{2\pi RC}$$

Підставляючи значення R = 10 кОм та C = 10 нФ отримуємо

$$f_{low} = \frac{1}{2\pi * 10000 * 10 * 10^{-9}} = 1.59 \text{ кГц}$$

Для визначення верхньої межі смуги пропускання враховується параметр Gain Bandwidth Product операційного підсилювача LM324 який становить 1 МГц. Верхня частота визначається як

$$BW = \frac{1 \text{ МГц}}{K} = \frac{1 \text{ МГц}}{8.5} = 117 \text{ кГц}$$

Смуга пропускання підсилювача визначається різницею між верхньою та нижньою частотою

$$BW = 117 \text{ кГц} - 1.59 \text{ кГц} = 115 \text{ кГц}$$

Оскільки робоча частота ультразвукового сигналу становить 40 кГц і знаходиться в межах смуги пропускання сигнал проходить без спотворень

Для перевірки роботи фільтра визначається реактивний опір конденсатора C1 при частоті 40 кГц

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi * 40000 * 10 * 10^{-9}} = 398 \text{ Ом}$$

Отримане значення підтверджує ефективність роботи високочастотного фільтра

Для оцінки впливу струму зміщення операційного підсилювача використовується параметр input bias current який для LM324 становить 45 нА.

Падіння напруги визначається за законом Ома

$$V = IR = 45 \text{ нА} * 75 \text{ кОм} = 3.37 \text{ мВ}$$

Отримане значення є незначним та не впливає на роботу схеми

Для перевірки швидкодії підсилювача використовується параметр Slew Rate.

Для сигналу амплітудою 5 В та частотою 40 кГц необхідний Slew Rate визначається за формулою

$$SR = 2\pi f = 2\pi * 40000 * 5 = 1.26\ \text{В/мкс}$$

Максимальний Slew Rate операційного підсилювача LM324 становить 0.5 В/мкс що менше розрахованого значення. Отже підсилювач працює у режимі обмеження швидкодії що є типовим режимом для ультразвукових систем

Для стабілізації напруги живлення використовується фільтр на конденсаторі C5 ємністю 1 мкФ.

Частота зрізу фільтра визначається за формулою

$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

При внутрішньому опорі приблизно 10 Ом отримуємо

$$f = 15.9\ \text{кГц}$$

Для оцінки теплових втрат визначається потужність резистора R2.

Струм через резистор визначається за законом Ома

$$I = \frac{V}{R} = \frac{5}{75000} = 66\ \text{мкА}$$

Потужність визначається за формулою

$$P = I^2R = 0.33\ \text{мВт}$$

Отримане значення є значно меншим за допустиме тому використання стандартних резисторів є достатні

2.12 Розрахунок блоку детектору ехосигналу

Основною задачею даного блоку є випрямлення сигналу формування огинаючої згладжування високочастотної складової та формування логічного імпульсу Echo.

Для стабілізації сигналу перед детектуванням використовується операційний підсилювач U2A включений за схемою неінвертуючого підсилювача Коефіцієнт підсилення визначається за формулою

$$K = 1 + \frac{R9}{R7}$$

Підставляючи значення R9 = 120 кОм та R7 = 75 кОм отримуємо

$$K = 1 + \frac{120}{75} = 2.6$$

Отримане значення означає що сигнал додатково підсилюється у 2.6 рази Мінімальна амплітуда сигналу після підсилення становитиме

$$V_{out} = 0.5 * 2.6 = 1.3\text{В}$$

Максимальна амплітуда сигналу становитиме

$$V_{out} = 5 * 2.6 = 13\text{В}$$

Оскільки операційний підсилювач працює від напруги живлення 5 В вихідний сигнал обмежується рівнем живлення і знаходиться у межах від 1.3 В до 5 В

Для визначення швидкості згладжування сигналу розраховується постійна часу RC кола

$$\tau = RC$$

Підставляючи значення R10 = 3.3 МОм та C6 = 10 нФ отримуємо

$$\tau = 3.3 * 10^6 * 10 * 10^{-9} = 0.033\text{с} = 33\text{мс}$$

Отримане значення показує що високочастотна складова сигналу буде згладжена а імпульс ехосигналу залишиться Для підтвердження цього визначається частота згладжування

$$f = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi * 3.3 * 10^6 * 10 * 10^{-9}} = 4.8\text{Гц}$$

Оскільки робоча частота сигналу становить 40 кГц вона значно перевищує частоту згладжування тому сигнал ефективно випрямляється та згладжується

Для перевірки роботи конденсатора визначається реактивний опір при частоті 40 кГц

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi * 40000 * 10 * 10^{-9}} = 398\text{Ом}$$

Отримане значення підтверджує ефективну роботу детектора

Для визначення струму через резистор R10 використовується закон Ома

$$I = \frac{V}{R} = \frac{5}{3.3 * 10^6} = 1.5\text{мкА}$$

Потужність резистора визначається за формулою

$$P = I^2R = (1.5 * 10^{-6})^2 * 3.3 * 10^6 = 7.4\text{мкВт}$$

Отримане значення значно менше допустимого тому використання стандартного резистора є достатнім

Базовий струм транзистора визначається за формулою

$$I_b = \frac{V}{R} = \frac{5}{10000} = 0.5\text{мА}$$

Колекторний струм визначається з урахуванням коефіцієнта підсилення транзистора

$$I_c = I_b * hFE = 0.5\text{мА} * 200 = 100\text{мА}$$

Отримане значення відповідає максимальному струму транзистора що означає роботу транзистора в режимі насичення

Для перевірки швидкодії транзистора враховується час наростання сигналу який для BC847 становить приблизно 5 нс.

Для перевірки швидкодії операційного підсилювача визначається необхідний параметр Slew Rate

$$SR = 2\pi fV = 2\pi * 40000 * 5 = 1.26\text{Вмкс}$$

Оскільки максимальний Slew Rate для LM324 становить 0.5 В мкс операційний підсилювач працює в режимі обмеження швидкості що є допустимим режимом для детектора огинаючої.

2.13 Розрахунок блоку фільтру сигналу

Основною задачею даного блоку є визначення порогового рівня сигналу фільтрація шумів формування логічного імпульсу та забезпечення гістерезису для стабільної роботи схеми Для формування опорної напруги використовується подільник напруги на резисторах R4 та R3 Опорна напруга визначається за формулою

$$V_{ref} = \frac{R3}{R3 + R4} * V_{cc}$$

Підставляючи значення R3 = 4.53 кОм R4 = 120 кОм та Vcc = 5 В отримуємо

$$V_{ref} = \frac{4.53}{124.53} * 5 = 0.182\text{В}$$

Отримане значення визначає поріг спрацювання компаратора приблизно 182 мВ Це означає що слабкі сигнали та шуми не будуть викликати перемикання компаратора а проходити буде тільки ехосигнал.

Для оцінки енергоспоживання подільника визначається струм через резистори Струм визначається за законом Ома

$$I = \frac{V}{R} = \frac{5}{124.53 * 10^3} = 40\text{мкА}$$

Отримане значення показує що подільник має мале споживання струму Для визначення потужності резистора використовується формула

$$P = I^2R = (40 * 10^{-6})^2 * 120 * 10^3 = 0.19\text{мВт}$$

Отримане значення значно менше допустимого тому використання стандартних резисторів є достатнім

Для підвищення шумостійкості використовується позитивний зворотний зв'язок на резисторах R5 та R6 який формує гістерезис компаратора Величина гістерезису визначається за формулою

$$V_{hys} = V_{out} * \frac{R5}{R5 + R6}$$

Підставляючи значення, отримуємо

$$V_{hys} = 5 * \frac{3.9}{13.9} = 1.4\text{В}$$

Отримане значення визначає діапазон перемикання компаратора Для визначення верхнього порогу використовується формула

$$V_{TH+} = V_{ref} + \frac{V_{hys}}{2} = 0.182 + 0.7 = 0.88\text{В}$$

Нижній поріг визначається за формулою

$$V_{TH-} = V_{ref} - \frac{V_{hys}}{2} = 0.182 - 0.7 = -0.52\text{В}$$

Оскільки операційний підсилювач живиться однополярною напругою мінімальне значення обмежується рівнем 0 В тому реальний нижній поріг становить 0 В

Отриманий гістерезис приблизно 1.4 В забезпечує високу шумостійкість та стабільність роботи компаратора

Для оцінки впливу вхідного струму операційного підсилювача використовується параметр input bias current який для LM324 становить 45 нА Падіння напруги визначається за формулою

$$V = IR = 45 * 10^{-9} * 120 * 10^{3} = 5.4\text{мВ}$$

Отримане значення є незначним та не впливає на точність роботи компаратора

Для перевірки швидкодії компаратора визначається необхідний параметр Slew Rate

$$SR = 2\pi fV = 2\pi * 40000 * 5 = 1.26\text{Вмкс}$$

Максимальний Slew Rate операційного підсилювача LM324 становить 0.5 В мкс тому компаратор працює у режимі обмеження швидкодії що є допустимим режимом для даного типу сигналу

Для перевірки навантажувальної здатності використовується вихідний струм операційного підсилювача який становить приблизно 5 мА що є достатнім для формування логічного сигналу для мікроконтролера

2.14 Розрахунок блоку формувачу сигналу для MCU

Основною задачею даного блоку є підсилення струму узгодження рівнів сигналу та захист входу мікроконтролера Для реалізації блоку використовується транзистор BC847 та резистори R11 і R12 .Сигнал з компаратора надходить на базу транзистора через резистор R11 При високому рівні сигналу транзистор відкривається а при низькому рівні транзистор закривається Таким чином формується інвертуючий ключ який забезпечує формування цифрового сигналу для мікроконтролера .Для визначення режиму роботи транзистора необхідно розрахувати базовий струм Базовий струм визначається за формулою

$$I_B = \frac{V_{in} - V_{BE}}{R}$$

де напруга база емітер становить 0.7 В а вхідна напруга дорівнює 5 В Підставляючи значення отримуємо

$$I_B = \frac{5 - 0.7}{10000} = 0.43\text{мА}$$

Отримане значення базового струму використовується для визначення колекторного струму транзистора Колекторний струм визначається за формулою

$$I_C = I_B * hFE$$

Коефіцієнт підсилення транзистора BC847 становить приблизно 200 Підставляючи значення отримуємо

$$I_C = 0.43\text{мА} * 200 = 86\text{мА}$$

Отримане значення показує максимально можливий струм транзистора Для визначення реального струму використовується навантажувальний резистор R12 який формує струм колектора Струм визначається за законом Ома

$$I_C = \frac{V}{R} = \frac{5}{1000} = 5\text{мА}$$

Для перевірки режиму насичення визначається співвідношення

колекторного та базового струму

$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{5}{0.43} = 11.6$$

Оскільки для насичення транзистора необхідно щоб співвідношення було менше 20 транзистор працює у режимі насичення що забезпечує стабільне перемикання. Для визначення потужності яка розсіюється на транзисторі використовується формула

$$P = V_{CE} * I_C$$

Напруга насичення транзистора становить приблизно 0.1 В Підставляючи значення отримуємо

$$P = 0.1 * 5\text{мА} = 0.5\text{мВт}$$

Отримане значення є значно меншим за допустиме що підтверджує безпечний режим роботи транзистора

Для перевірки потужності резистора R11 використовується формула

$$P = I^2R = (0.43\text{мА})^2 * 10000 = 1.8\text{мВт}$$

Потужність резистора R12 визначається за формулою

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{25}{1000} = 25\text{мВт}$$

Отримані значення є значно меншими за допустимі що підтверджує правильний вибір елементів. Для перевірки швидкодії транзистора використовується час перемикання який для BC847 становить приблизно 5 нс Оскільки частота ехосигналу становить 40 кГц швидкодія транзистора є достатньою для стабільної роботи. Для оцінки впливу паразитної ємності бази використовується параметр CBE який становить приблизно 10 пФ Постійна часу визначається за формулою

$$\tau = RC = 10000 * 10 * 10^{-12} = 100\text{нс}$$

Частота перемикання визначається за формулою

$$f = \frac{1}{2\pi\tau} = 1.6\text{МГц}$$

Отримане значення значно перевищує робочу частоту сигналу що підтверджує стабільну роботу схеми

2.15 Розрахунок блоку передавального ультразвукового каскаду

Основною задачею даного блоку є підсилення струму керування ультразвуковим датчиком та узгодження сигналу з мікроконтролером

Для визначення струму ультразвукового передавача використовується закон Ома Припускаючи імпеданс датчика приблизно 300 Ом струм визначається за формулою

$$I = \frac{V}{R} = \frac{5}{300} = 16.7\text{мА}$$

Отримане значення відповідає типовому струму ультразвукового передавача

Для керування транзистором використовується резистор R13 який обмежує базовий струм Базовий струм визначається за формулою

$$I_B = \frac{V_{MCU} - V_{BE}}{R}$$

де напруга база емітер становить 0.7 В Підставляючи значення отримуємо

$$I_B = \frac{5 - 0.7}{1000} = 4.3\text{мА}$$

Отримане значення необхідно перевірити відносно допустимого струму мікроконтролера.

Для визначення можливого колекторного струму використовується коефіцієнт підсилення транзистора BC847 який становить приблизно 200 Колекторний струм визначається за формулою

$$I_C = I_B * hFE = 4.3\text{мА} * 200 = 860\text{мА}$$

Отримане значення є теоретичним та обмежується максимальним струмом транзистора який становить 100 мА Реальний струм визначається навантаженням та становить 16.7 мА що знаходиться в межах допустимих значень

Для перевірки режиму насичення визначається співвідношення струмів

$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{16.7}{4.3} = 3.8$$

Оскільки для режиму насичення необхідно щоб це значення було менше 20 транзистор працює у режимі насичення

Для визначення потужності транзистора використовується формула

$$P = V_{CE} * I_C$$

При напрузі насичення приблизно 0.1 В отримуємо

$$P = 0.1 * 16.7\text{мА} = 1.67\text{мВт}$$

Отримане значення значно менше допустимого що підтверджує безпечний режим роботи

Для визначення потужності резистора R13 використовується формула

$$P = I^2R = (4.3\text{мА})^2 * 1000 = 18.5\text{мВт}$$

Для резистора підтяжки R14 визначається струм

$$I = \frac{V}{R} = \frac{5}{10000} = 0.5\text{мА}$$

Для перевірки швидкодії транзистора враховується частота зрізу BC847 яка становить приблизно 100 МГц

Для оцінки впливу ємності ультразвукового передавача використовується типове значення 2 нФ Постійна часу визначається за формулою

$$\tau = RC = 300 * 2 * 10^{-9} = 600\text{нс}$$

Гранична частота визначається за формулою

$$f = \frac{1}{2\pi\tau} = 265\text{кГц}$$

Отримане значення значно перевищує робочу частоту 40 кГц що підтверджує коректну роботу каскаду

Для визначення потужності сигналу використовується формула

$$P = VI = 5 * 16.7\text{мА} = 83\text{мВт}$$

Оскільки сигнал формується імпульсами визначається середня потужність

$$P_{avg} = 83\text{мВт} * 0.1 = 8.3\text{мВт}$$

2.16 Опис програмної частини системи



Рисунок 2.13 – Програмний код системи контролю рівня рідини

Програмна частина системи реалізована на базі мікроконтролерної плати Arduino Uno Rev3, що побудована на мікроконтролері ATmega328P. Даний програмний код призначений для реалізації автоматичної системи контролю рівня рідини у резервуарі з використанням ультразвукового датчика відстані, рідкокристалічного дисплея та виконавчого механізму у вигляді насоса. Основною функцією програми є вимірювання рівня води, відображення результату на дисплеї та автоматичне керування насосом залежно від рівня наповнення резервуара.

На початку програмного коду підключається бібліотека для роботи з

рідкокристалічним дисплеєм. Для цього використовується стандартна бібліотека LiquidCrystal library, яка дозволяє керувати символьними LCD-дисплеями.

Після підключення бібліотеки виконується ініціалізація дисплея. Для цього задаються номери контактів мікроконтролера, до яких підключений дисплей. У даному випадку використовуються цифрові виводи 13, 12, 11, 10, 9 та 8. Таким чином створюється об'єкт lcd, який використовується для подальшого керування дисплеєм

Water_Pump_Code §

```
#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(13, 12, 11, 10, 9, 8);
```

Рисунок 2.13 – Ініціалізація кристалічного дисплея у коді системи

Далі у програмі визначаються контакти підключення ультразвукового датчика. Контакт trigPin використовується для формування імпульсу запуску вимірювання, а контакт echoPin призначений для прийому відбитого сигналу. Для цього використовуються цифрові виводи 5, 6 та відповідно визначається контакт для керування насосом який підключений до виводу 7 мікроконтролера

Water_Pump_Code §

```
const int trigPin = 5;
const int echoPin = 6;
const int Motor_Pin = 7;
```

Рисунок 2.14 – Визначення контактів підключення ультразвукового датчика та виконавчого механізму

Після визначення контактів оголошуються змінні які використовуються у програмі. Змінна duration використовується для збереження часу проходження ультразвукового сигналу. Змінна distance використовується для збереження обчисленої відстані до поверхні води, а додатково створюється логічна змінна Motor яка використовується для керування станом насоса. Використання логічної змінної дозволяє спростити алгоритм керування та підвищити читабельність програмного коду

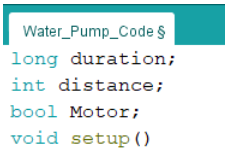


Рисунок 2.15 – Оголошення змінних для обчислення та керування насосом

Далі у функції setup виконується початкова ініціалізація системи. Функція setup виконується один раз після подачі живлення на мікроконтролер. У цій функції налаштовуються режими роботи контактів мікроконтролера.

Контакт trigPin встановлюється у режим виходу оскільки він використовується для формування імпульсу запуску вимірювання, контакт echoPin встановлюється у режим входу оскільки він приймає сигнал від ультразвукового датчика, контакт керування насосом також встановлюється у режим виходу, після налаштування контактів виконується ініціалізація дисплея. У даному випадку використовується дисплей з двома рядками по 16 символів.

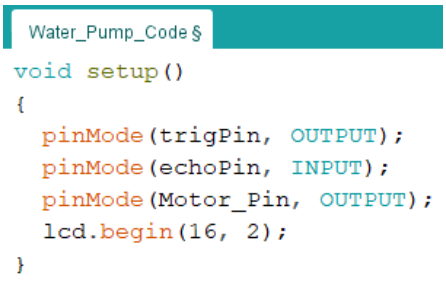


Рисунок 2.16 – Ініціалізація режимів контактів та налаштування дисплея

Основна робота системи реалізована у функції loop яка виконується безперервно у циклі. На початку циклу формується імпульс запуску ультразвукового датчика. Для цього контакт trigPin встановлюється у низький рівень на короткий час, після цього формується імпульс тривалістю 10 мікросекунд, цей імпульс запускає ультразвуковий передавач який випромінює ультразвукову хвилю. Після відбиття від поверхні води сигнал повертається до приймача. Для вимірювання часу проходження сигналу використовується функція pulseIn, дана функція визначає тривалість імпульсу

у мікросекундах що відповідає часу проходження ультразвукової хвилі до поверхні води та назад. після отримання значення часу виконується обчислення відстані до поверхні води. Коефіцієнт 0.034 відповідає швидкості поширення звуку у повітрі яка становить приблизно 340 мс. Ділення на два виконується тому що сигнал проходить шлях до об'єкта та назад Далі отримана відстань перетворюється у відсотковий рівень заповнення резервуара.

Для цього використовується функція map яка перетворює значення з одного діапазону в інший, у даному випадку значення відстані перетворюється у відсотки від 0 до 100 що відповідає рівню заповнення резервуара, після обчислення рівня води інформація виводиться на дисплей. Для цього встановлюється позиція курсора, після цього виводиться текст Water та значення рівня заповнення, далі реалізується логіка керування насосом. Якщо рівень води менше 30 відсотків насос вмикається, якщо резервуар заповнений повністю насос вимикається.

Після цього перевіряється стан змінної Motor. Якщо змінна має значення true насос вмикається, одночасно на дисплеї відображається повідомлення Pump ON, якщо змінна Motor має значення false насос вимикається, на дисплеї відображається повідомлення Pump OFF.

Water_Pump_Code §

```
void loop()
{
  digitalWrite(trigPin, LOW);
  delayMicroseconds(2);
  digitalWrite(trigPin, HIGH);
  delayMicroseconds(10);
  digitalWrite(trigPin, LOW);
  duration = pulseIn(echoPin, HIGH);
  distance = duration * 0.034 / 2;
  int Level = map(distance, 0, 110, 0, 100);
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Water: ");
  lcd.print(Level);
  lcd.print("%     ");
  if (Level < 30)
  {
    Motor = true;
  }
  if (Level >= 100)
  {
    Motor = false;
  }
  if (Motor)
  {
    digitalWrite(Motor_Pin, HIGH);
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Pump: ON      ");
  }
  else
  {
    digitalWrite(Motor_Pin, LOW);
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Pump: OFF       ");
  }
}
```

Рисунок 2.17 – Формування ультразвукового імпульсу та обчислення рівня

2.17 Демонстрація роботи системи

Для перевірки працездатності системи було проведено тестування при різних рівнях заповнення резервуара.

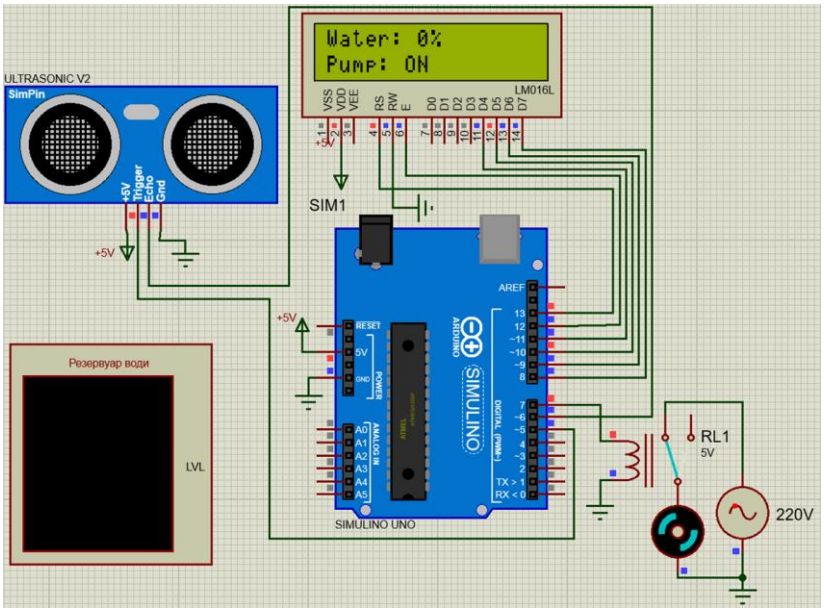


Рисунок 2.18 – Експериментальний стенд системи контролю рівня рідини та перевірка роботи

На рисунку представлено експериментальний стенд системи контролю рівня рідини, що складається з мікроконтролера, ультразвукового датчика, дисплея та виконавчого механізму.

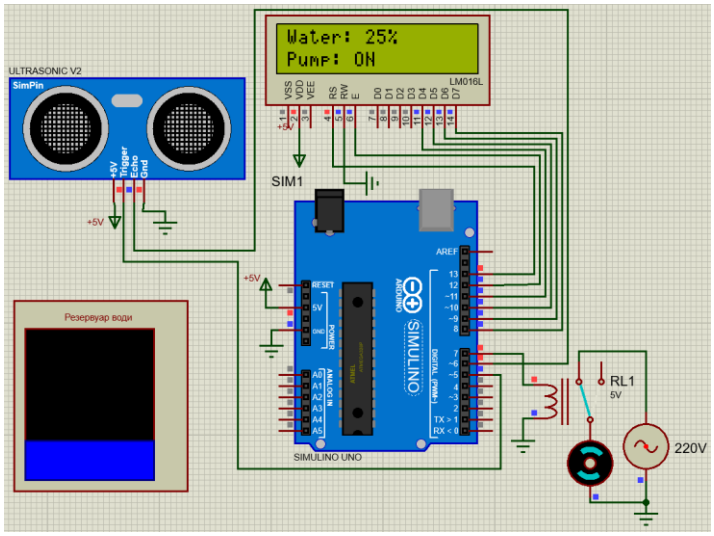


Рисунок 2.19 – Експериментальний стенд системи контролю рівня рідини та перевірка роботи при 25% наповненості

У цьому режимі ультразвуковий датчик визначає велику відстань до поверхні рідини, після чого мікроконтролер формує сигнал на увімкнення насоса. На дисплеї відображається рівень води та повідомлення про увімкнення насоса.

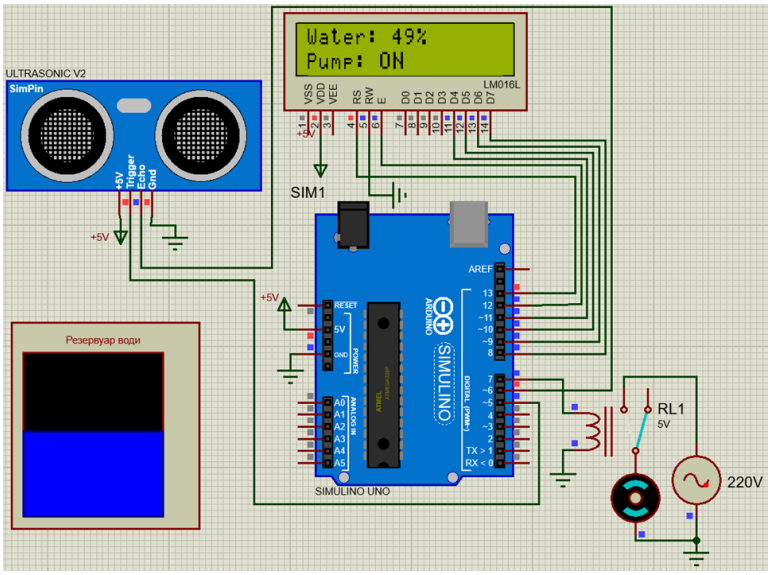


Рисунок 2.20 – Експериментальний стенд системи контролю рівня рідини та перевірка роботи при 50% наповненості

У цьому режимі система продовжує моніторинг рівня рідини, при цьому насос може залишатися увімкненим або вимкненим залежно від заданого алгоритму роботи.

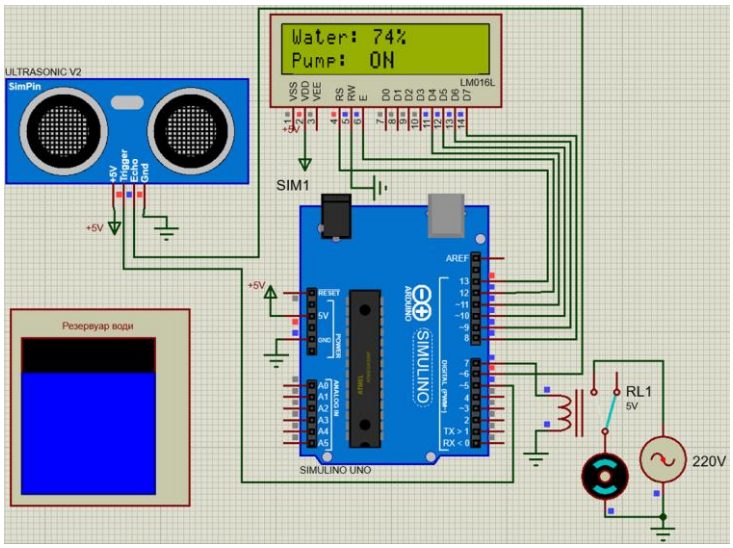


Рисунок 2.21 – Експериментальний стенд системи контролю рівня рідини та перевірка роботи при 75% наповненості

Система контролює наближення рівня рідини до максимального значення та готується до вимкнення виконавчого механізму.

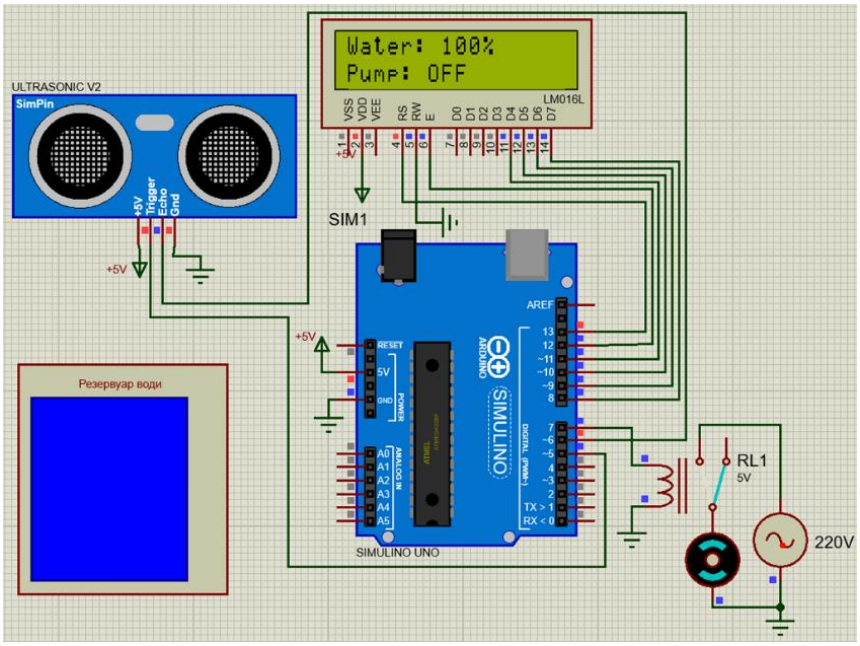


Рисунок 2.22 – Експериментальний стенд системи контролю рівня рідини та перевірка роботи при 100% наповненості

У цьому режимі насос автоматично вимикається, що запобігає переповненню резервуара. На дисплеї відображається значення 100% та повідомлення про вимкнення насоса.

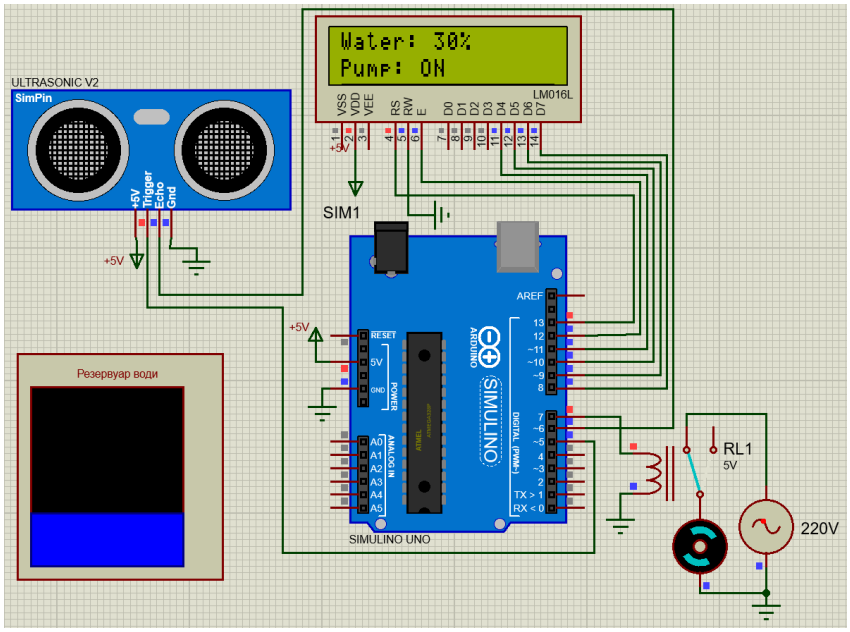


Рисунок 2.23 – Експериментальний стенд системи контролю рівня рідини та перевірка роботи при 30% наповненості

Після зменшення рівня рідини до 30% ультразвуковий датчик визначає збільшення відстані до поверхні води. Отримані дані передаються до мікроконтролера, який відповідно до алгоритму керування формує сигнал на увімкнення насоса.

Після проведення демонстрації роботи системи при різних рівнях заповнення резервуара доцільно представити конструктивну реалізацію розробленого пристрою у вигляді тривимірної моделі. Тривимірна модель дозволяє оцінити розташування елементів системи, зручність монтажу та загальний вигляд пристрою.

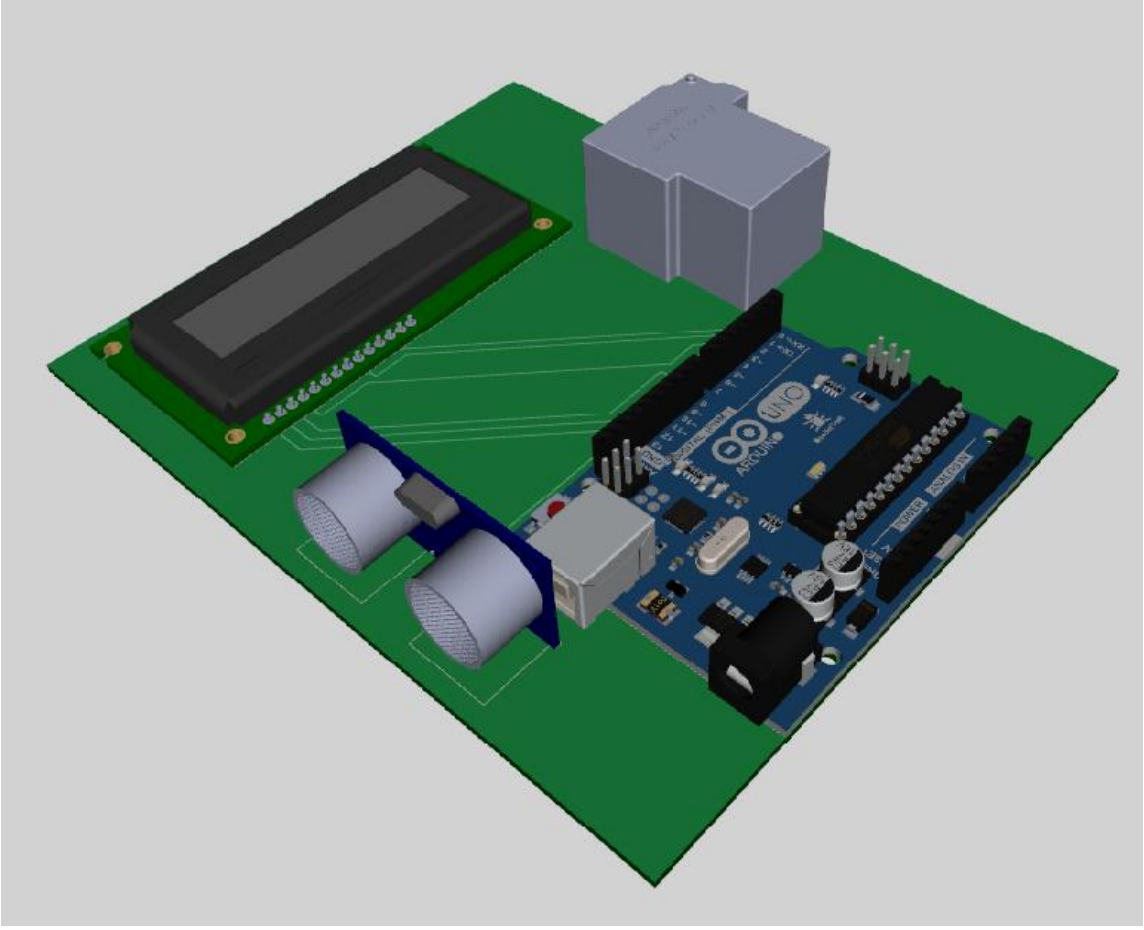


Рисунок 2.24 – 3D-модель пристрою вигляд з передньої сторони

На рисунку представлено тривимірну модель розробленої системи контролю рівня рідини з передньої сторони. На моделі показано розташування ультразвукового датчика, рідкокристалічного дисплея, мікроконтролера та основних елементів керування. Передня панель пристрою містить елементи індикації та вимірювання що забезпечує зручність експлуатації системи.

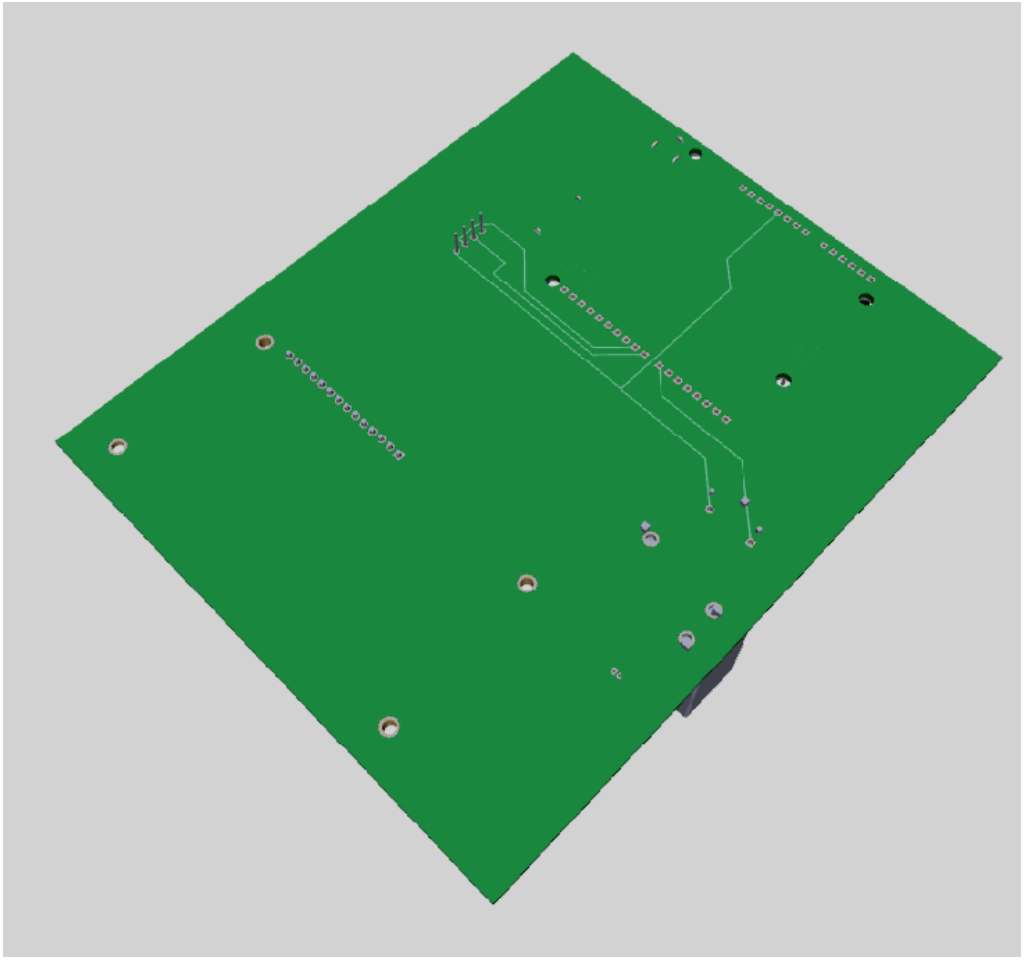


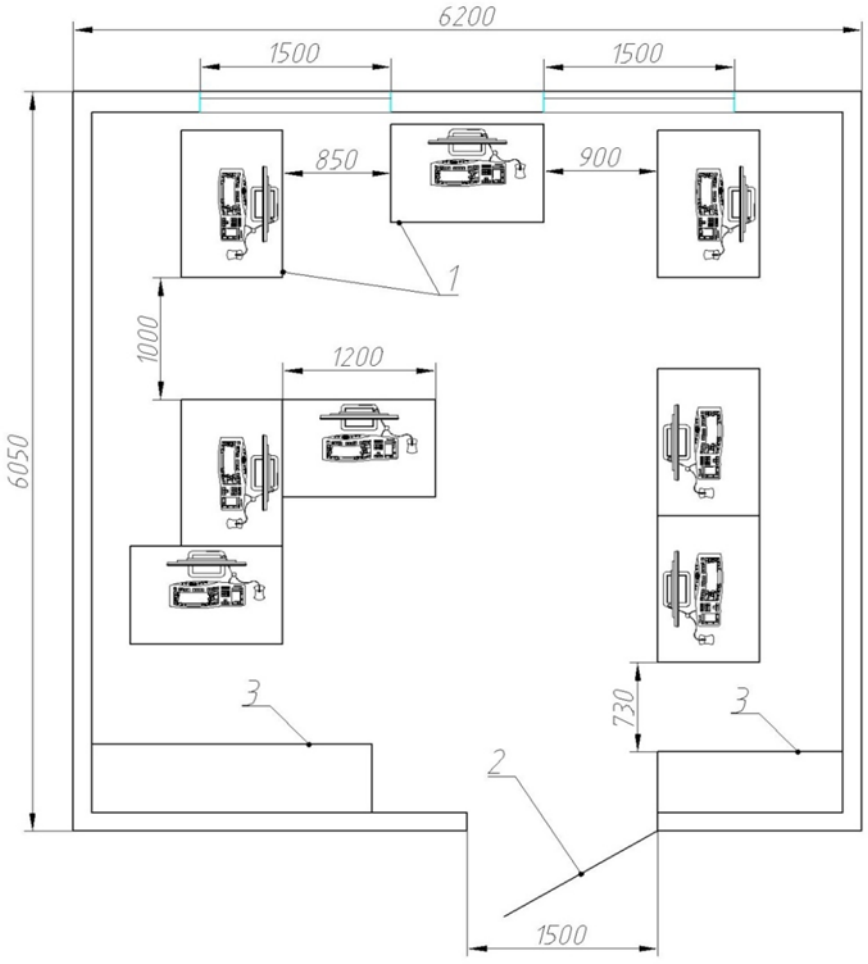
Рисунок 2.25 – 3D-модель пристрою вигляд із задньої сторони плати

На рисунку представлено тривимірну модель пристрою із задньої сторони плати. Показано розташування друкованих провідників монтажних елементів та підключення виконавчих компонентів системи. Дана модель дозволяє оцінити конструктивні особливості розміщення елементів та правильність трасування друкованої плати.

РОЗДІЛ 3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Даний об'єкт: приміщення лабораторії інформаційних технологій (рисунок 3.1).



робочі столи; 2 – двері; 3 – шафа.

Рисунок 3.1 – План розташування робочих місць

Розміри приміщення складають: довжина 6,05 м, ширина 6,2 м, висота 3м. Загальна площа дорівнює 37,51 м2. У приміщенні працюють 8 співробітників, тобто на кожного доводиться по 4,7 м2. Забарвлення стін

світло-коричневе, стеля - біла, підлога - паркетна, світло-коричнева. У приміщені лабораторії є два вікна, які виходять на сонячну сторону будівлі. Скло на вікнах закривають жалюзі білого кольору. Джерело світла в приміщенні - люмінесцентні лампи, висота підвіски світильників 2,9 м, відстань між світильниками 1 м.

Особливістю негативного впливу комп'ютерних технологій на працездатність і здоров'я людини є комплексна одночасна дія декількох шкід¬ливих факторів, при значній інтенсивності яких відбувається накопичен¬ня і акумулювання їх впливу, що викликає суттєві зміни в організмі людини, розлад функцій окремих органів і систем.

До основних негативних факторів належать: випромінювання різних діапазонів електромагнітного спектру (рентгенівське та оптичне випромінювання, високочастотні та низькочастотні ЕМП, ЕМП з надто низь¬кими частотами, електростатичні поля), шум у джерелі ВДТ, психосоціальні фактори виробничого середовища, нервово-емоційна напруга та інші.

Робота ЕВМ і ВДТ призводить до зміни фонової концентрації іонів повітря. Так приблизно через 5 хвилин роботи монітору концентрація легких негативних іонів знижується в 5-10 разів (фонове значення цього показника становить 350-620 іонів/смЗ), а через 3 години роботи їх кон¬центрація наближається до нуля. Знижується, також, концентрація серед¬ніх і тяжких негативних іонів, натомість концентрація позитивного заря¬джених іонів різко зростає, що дуже негативно відбивається на газообміні в легенях, загальному почутті людини. Значна кількість позитивних іонів, особливо тяжких, призводить до підвищення артеріального тиску, тахікардії, прояву болю в області серця, затруднення дихання, прискоренню швидкості осідання еритроцитів, розладу функцій центральної нервової системи (дратівливість, головний біль, порушення сну, тонусу м'язів і ін., порушення травлення).

Оптимальним рівнем аероіонізації на робочому місці вважається вміст легких іонів від 150 до 5000 в 1 смЗ повітря.

Доза рентгенівського випромінювання перед екраном монітора на

відстані 50 см від його поверхні є безпечною, вона не досягає межі допустимого рівня (50 мкР/год), але не вивчена дія цих променів у поєднанні з іншими, які генеруються ЕОМ на людину, що не дозволяє говорити від¬носно безпечної їх дії.

Згідно даних ВООЗ, електромагнітні випромінювання викликають розвиток катаракти. Потенційно сприяють розвитку катаракти іонізуюче, ультрафіолетове - А, інфрачервоне і мікрохвильове випромінювання.

На працездатність та самопочуття людини негативно впливає шум від роботи електронно-обчислювальних машин. При цьому тривала дія шуму призводить до зниження розумової працездатності на 10-15%, швидкої зорової втоми, послаблення уваги, порушення психофізіологіч¬них процесів. Вплив шуму ВДТ є однією із причин розвитку стресу, пога¬ршення настрою, сенсорного перевантаження, змін кровопостачання тканин і органів у зв'язку зі спазмами капілярів.

Професійна діяльність працівника на ВДТ є причиною функціональних змін нервово-м'язового апарата і кровопостачання ока, які призво¬дять до розвитку астеноптичних скарг. Встановлено, що жінки частіше, ніж чоловіки, скаржаться на зоровий дискомфорт. При цьому відмічено, що в більшості випадків частота астенопії зростає зі збільшенням трива¬лості роботи за ВДТ.

Астноптичні скарги пов'язані також з освітленням робочого місця, відблиском екрану, тремтінням та мерехтінням зображення, сухістю пові¬тря тощо. Встановлено, що у 72% користувачів ВДТ мають місце скарги на біль в очах. Результатом напруженої тривалої зорової роботи на ЕОМ може бути не лише специфічній зоровий дискомфорт, але і виникнення головного болю.

Стресові стани, які розвиваються при довготривалій напруженій ро¬боті за ЕОМ, є однією із причин виникнення соматичних, фізіологічних, психологічних змін в організмі.

Фізіологічні порушення супроводжуються розладами функцій шлунково-кишкового тракту, серцево-судинної системи, скелетних м'язів, за¬лоз внутрішньої секреції, шкіри, статевої системи. Встановлено, що ці розлади

частіше мають місце у працівників з високою та середньою три¬валістю роботи за ЕОМ.

До психологічних і поведінкових розладів відносяться: агресивність, фрустрація, нервозність, дратівливість, порушення сну, швидкий розви¬ток втоми тощо.

Зміни на соматичному, фізіологічному, психологічному і поведінковому рівнях працівників на електронно-обчислювальних машинах та відеодисплейних терміналах пов'язані з високим навантаженням при виконанні завдань, високою емоціонально-психологічною напруженістю та дією негативних виробничих факторів.

Для визначення заходів поліпшення умов праці в даній лабораторії складена таблиця основних характеристик приміщення (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Узагальнена таблиця характеристик лабораторії інформаційних технологій

№	Назва характеристик	Нормативне значення	Фактичне значення	Відхилення
1.	Загальна площа	-	37,51 м^2	-
2.	Кількість робочих місць	-	8	-
3.	Площа 1-го робочого місця	6 м^2	4,7 м^2	-1,3 м^2
4.	Джерело світла в приміщенні - комбіноване	>750лк	800лк	+50лк (норма)

3.2 Заходи з поліпшення умов праці

Організація робочого місця користувача відеотермінала повинна забезпечувати відповідність усіх елементів робочого місця та їх розташування ергономічним вимогам, характеру та особливостям трудової діяльності. Площа одного робочого місця повинна бути не менше 6 м2, а обсяг – не менше 20 м3. Але данна вимога не відповідає дійсності в лабораторії інформаційних технологій, так як площа на одне робоче місце складає лише 4,7 м2. Для дотримання ергономічних вимог необхідно перенести два робочих місця в інше приміщення, тим самим вирішиться питання зменшення випромінювання від ЕОМ сусідніх робочих місць.

Робочі місця для працюючих з дисплеями необхідно розташову-вати таким чином, щоб до поля зору працюючого не потрапляли вікна та освітлювальні прилади. Відеотермінали повинні встановлювати-ся під кутом 90 - 105 градусів до вікон та на відстані, не меншій 2,5-3м від стіни з вікнами.

До поля зору працюючого з дисплеєм не повинні потрапляти поверхні, які мають властивість віддзеркалювання. Покриття столів повинне бути матовим з коефіцієнтом 0,25 - 0,4.

Відстань між робочими місцями з ПК повинна бути не меншою 1,5 м у ряду та не меншою 1 м між рядами. ПК повинні розміщуватися не ближче 1 м від джерела тепла.

Відстань від очей користувача до екрану повинна становити 500 - 700 мм, кут зору - 10 - 20 градусів, але не більше 40 градусів, кут між верхнім краєм відео терміналу та рівнем очей користувача повинен бути меншим 10 градусів. Найбільш вигідне є розташування екрану перпендикулярно до лінії зору користувача.

Для захисту від шуму у виробничому приміщенні та на робочих міс¬цях застосовуються шумопоглинальні засоби (негорючі спеціальні пер¬форовані плити, мінеральна вата, підвісні стелі й ін.). Під матричні принтери треба підкладати вібраційні кили¬мки для гасіння вібрації та шуму.

3.3 Пожежна безпека

Дане приміщення за ступенем пожежної небезпеки можна віднести до класу «Е», тому що в роботі використовується папір, пластикові меблі й меблі з ДВП. За ступенем вогнестійкості приміщення відноситься до II категорії. Це відповідає нормам пожежної безпеки, зазначеним у СНіП 2.01.02-85.

Приміщення, в яких розташовані комп'ютери, повинні бути не нижче II ступеня вогнестійкості. Поруч з приміщенням не повинен бути приміщень пожежо-та вибухонебезпечних. У приміщеннях повинні зберігатися ті носії інформації, які необхідні для роботи, решта – в окремих приміщеннях на негорючих стелажах у залізних коробках. Підлоги повинні бути знімні і повинні бути виготовленні бути виготовленні з негорючих або важко горючих матеріалів. Підпільний простір має бути оснащений системою автоматичної пожежної сигналізацією, автоматичною установкою пожежогасіння. Приміщення повинно бути оснащене сигналізацією з димооповестітелями і пожежогасіння. У приміщенні повинні знаходитися переносні вуглекислотні вогнегасники 2 шт. на 20 м2 .

В аналізованому приміщенні встановлені димооповестітелі та пожежною сигналізацією. Приміщення має II ступеня вогнестійкості, так само в приміщенні площею 10 м 2 є один переносний вуглекислотний вогнегасник, що відповідає нормам охорони праці.

3.4 Техногенна безпека

Показником ефективності евакуації є час, протягом якого люди можуть при необхідності залишити окремі приміщення і будівлю чи споруду загалом.

Виходи вважаються евакуаційними, якщо вони ведуть: з приміщень першого поверху назовні безпосередньо або через коридор, вестибюль, сходову клітку; з приміщень будь-якого поверху, крім першого, в коридори, що ведуть на сходову клітку (в тому числі через хол); при цьому сходові клітки повинні мати вихід назовні безпосередньо або через вестибюль, відокремлений від прилеглих коридорів перегородками з дверима; з приміщень у сусіднє приміщення на цьому ж поверсі, що забезпечене виходами, зазначеними вище.

Евакуаційні виходи повинні розташовуватися розосереджено. Евакуаційних виходів повинно бути не менше двох. Двері на шляхах евакуації повинні відчинятися в напрямку виходу з будівель (приміщень). При наявності людей у приміщенні двері евакуаційних виходів можуть зачинятись лише на внутрішні засуви, які легко відмикаються. Мінімальна ширина шляхів евакуації- не менше 1 м, дверей - не менше 0,8 м.

З метою організації евакуації людей у випадку виникнення пожежі розроблений спеціальний план евакуації працівників будинку, який показаний на рисунку 3.2. Всі двері на шляху евакуації відкриваються тільки убік виходу. Сумарна ширина сходів, дверей і проходів на шляху евакуації не менша 1 м, що задовольняє вимогам ДБН В.1.1-7:2016. [12]

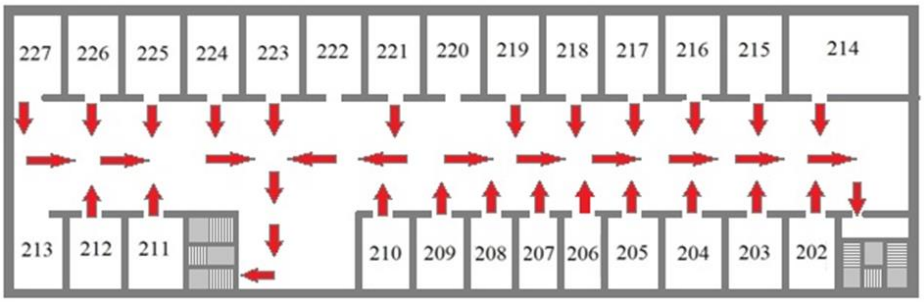


Рисунок 3.2 – План евакуації у випадку виникнення пожежі; 1 – приміщення в якому проводиться аналіз

3.5 Розрахунок захисного заземлення

Заземленню підлягають вимірювальні установки, напруга живлення яких 220В. У якості заземлювача візьмемо сталеві вертикальні стержні довжиною l = 2 м, діаметром d = 0,03 м, діаметр сполучної смуги b = 0,03

Контур заземлення розташовано нагоризонтальному майданчику біля корпу¬су академії. Грунт - суглинок.

Допустимий опір заземлюючого пристрою (Rн) дорівнює 4 Ом. Визначимо питомий електричний опір грунту (суглинку), ρ якого дорівнює 100 Ом·м. Розрахуємо опір розтікання струму одного вертикального стержня:

$$R_{\text{в}} = \frac{\rho}{2\pi l} \cdot \ln\frac{4 \cdot l}{d} = \frac{100}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 2} \ln\frac{4 \cdot 2}{0{,}03} = 44{,}46 \text{ Ом}$$

Приймемо число заземлювачів:

$$n = \frac{R_l}{R_n} = \frac{44{,}46}{4} = 11{,}1 \approx 12$$

Визначимо довжину горизонтальної смуги (по контуру):

$$l_{\text{г}} = a \cdot n = 2 \cdot 12 = 24 \text{ м}$$

де а - відстань між вертикальними електродами (а = 2 м)

Опір горизонтальної смуги:

$$R_{2\text{с}} = \frac{\rho}{\pi l_{\text{г}}} \ln\frac{4 \cdot l_{\text{г}}}{b} = \frac{100}{3{,}14 \cdot 24} \ln\frac{4 \cdot 24}{0{,}03} = 10{,}7 \text{ Ом}$$

Коефіцієнт екранування для вертикального заземлювача [13]:

$$\eta_{\text{в}} = \frac{0{,}68 + 0{,}56}{2} = 0{,}62$$

і для горизонтальної смуги

$$\eta_{\text{г}} = \frac{0{,}34 + 0{,}4}{2} = 0{,}37$$

Опір групи вертикальних заземлювачів:

$$R_{\text{гр}} = \frac{R_{\text{вз}}}{n \cdot \eta_{\text{в}}} = \frac{44{,}46}{12 \cdot 0{,}62} = 5{,}97 \text{ Ом}$$

Опір горизонтальної смуги з врахуванням екранування:

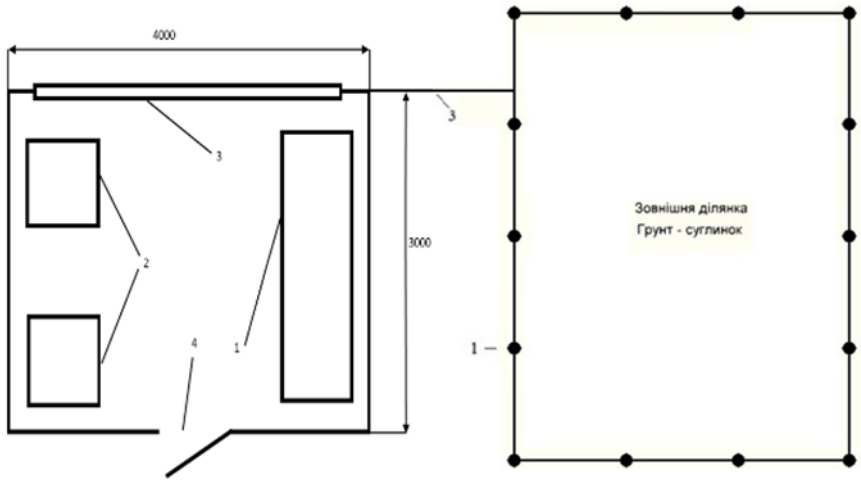
$$R_{\text{г}} = \frac{R_{\text{го}}}{\eta_{\text{г}}} = \frac{10{,}7}{0{,}37} = 28{,}91 \text{ Ом}$$

Опір заземлювача в цілому:

$$R_{\text{з}} = \frac{R_{\text{гр}} \cdot R_{\text{г}}}{R_{\text{гр}} + R_{\text{г}}} = \frac{5{,}97 \cdot 28{,}91}{5{,}97 + 28{,}91} = 4{,}94 \text{ Ом}$$

Як видно опір заземлювача перевищує нормативне (4 Ом), тому збільшимо кількість заземлювачів до n =14,тоді опір заземлювача в цілому складе Rз = 3,97<Rн.

Число заземлюначів дорівнює 14, які розміщені по контуру зовнішньої ділянки, як показано на рисунку 3.3.



1 – заземлювачі; 2 - електроустаткування що заземлюється;3 - сполучна смуга;

Рисунок 3.3 — Розміщення електродів заземлення на зовнішній ділянці та сполученої смуги лабораторії проведення експерименту

Таким чином, для виконання захисного заземлення використовується 14 вертикальних стержнів діаметром 0,03 м, завдовжки 2 м, кожен з яких має опір 44,46 Ом. Опір сполучної смуги 10,7 Ом. Опір заземлювачів в цілому складе 3,97 Ом, що забезпечує безпечну роботу на установках лабораторії.

ВИСНОВОКИ

1.Проведено аналіз існуючих пристроїв контролю рівня рідини, методів та засобів вимірювання рівня рідини в резервуарах, що дало можливість обґрунтувати та обрати елементну базу для розробки електричної принципової схеми функціонування пристрою вимірювання рівня води.

2.Проведено розрахунок параметрів та характеристик функціональних блоків електронної системи вимірювання рівня води на основі ультразвукового ехолокатора та мікроконтролерної плати на базі ATmega328P.

3.Досліджено принципи автоматизації процесів наповнення ємностей; виконано схемотехнічне та програмне проєктування та моделювання роботи пристрою з використанням систем автоматизованого проєктування Proteus та Arduino.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Резервуари для питної води: значення, особливості та сфери використання. 2025. URL: https://landlord.ua/news/novyny-partneriv/rezervuary-dlya-pytnoyi-vody-chomu-cze-vazhlyvo-dlya-zdorovya/ (дата звернення: 20.01.2026).

2. Water Tank Automation System Using Arduino. Arduino Expert. 2025. URL: https://arduinoexpert.com/iot-water-pump-tank-automation-using-nodemcu/ (дата звернення: 20.01.2026).

3. Automatic Water Level Controller Using Arduino. GeeksforGeeks. 2023. URL: https://www.geeksforgeeks.org/automatic-water-level-controller-using-arduino/ (дата звернення: 20.01.2026).

4. Domestic Water Storage Systems in India: Dual Water Supply Practice. 2023. URL: https://www.indiawaterportal.org/articles/domestic-water-storage-systems-india (дата звернення: 20.01.2026).

5. Arduino Based Water Tank Level Control System. Circuit Digest. 2024. URL: https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/arduino-water-level-controller (дата звернення: 20.01.2026).

6. Автоматичний кран для води на Arduino. 2022. URL: https://arduino.ua/art202-avtomatichnii-kran-dlya-vodi-na-arduino-svoimi-rykami?srsltid=AfmBOopkmXnH2Aljjsvfoa5ejo7q7dZ117qulDLM17-vSaIZk4k-YHxR (дата звернення: 20.01.2026).

7. Технологічна схема пристрою озонування питної води зі свердловини. 2023. URL: https://geekmatic.in.ua/ua/avtomaticheskoe_upravlenie_ozonatorom_vody (дата звернення: 22.01.2026).

8. Датчик рівня води: що це таке і як його підключити до Arduino. 2025. URL: https://ua.ariat-tech.com/blog/Water-Level-Sensor-What-It-Is-and-How-to-Connect-it-with-Arduino.html (дата звернення: 22.01.2026).

9. Розробка радіокерованого танка на базі Arduino Nano. 2024. URL:

https://arduino.ua/ru/art249-rozrobka-radiokerovanogo-tanka-na-bazi-arduino-nano?srsltid=AfmBOoqrzpQR79MiGozJcOsEqasdrzSEvJZw7nyDpntKI-gapgXBhYpo (дата звернення: 23.01.2026).

10. Реєстратор параметрів вологості та температури. 2022. URL: https://arduino.ua/art204-restrator-parametriv-vologosti-ta-temperatyri?srsltid=AfmBOorWgdaPs4arBNgg57n8rHWOtIWgShOcO44kADRj43bGUqlqC9NK (дата звернення: 24.01.2026).

11. Світанько .М.В., Верьовкін Л.Л., Ніконова З.А., Небеснюк О.Ю., Методичні вказівки до оформлення кваліфікаційного проекту. 2026. (дата звернення: 26.01.2026).

12. Дружинін А.О. Твердотільна електроніка. Фізичні основи і властивості напівпровідникових приладів: навч. посібник / А.О. Дружинін., Львів, 2019. 332 с.

13. Виготовлення друкованих плат для електроніки. URL: https://renome.biz/uk/index.php?route=news/article&news_id=61 (дата звернення квітень 2026 р.).

14. Виробнича санітарія та гігієна. URL: https://pidru4niki.com/15060913/bzhd/virobnicha_sanitariya_gigiyena (дата звернення: квітень 2026 р.).

15. Про затвердження правил пожежної безпеки в Україні. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15/ed20230407#Text (дата звернення: травень 2026 р.).

16. ДБН В 1.1-7:2016 Пожежна безпека. Загальні вимоги [Чинний від 01.06.2017] Вид. офіц. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2017, 38 с.

17. Основи охорони праці: навч. посіб. / Р.М. Івах та ін. 4-те вид. Київ: Кондор, 2010. 464 с.

18. Правила улаштування електроустановок: затв. Наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 20 червня 2014 р. №469. 793 с.