

Міністерство освіти і науки України
Департамент науки і освіти Харківської обласної державної адміністрації
Комунальний заклад «Харківська обласна Мала академія наук
Харківської обласної ради»

Відділення інженерії та матеріалознавства
Секція: електроніка та приладобудування

АКУСТИЧНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ВІТРУ

Роботу виконав:

Колесников Назар Євгенович,

учень 9 класу комунального закладу
«Харківський ліцей № 150 Харківської
міської ради»

Наукові керівники:

Шутова Світлана Іллівна, вчитель фізики
комунального закладу «Харківський ліцей №
150 Харківської міської ради», спеціаліст
вищої категорії, учитель-методист;

Молоткова Ірина Ігорівна, вчитель
інформатики комунального закладу
«Харківський ліцей № 150 Харківської
міської ради», спеціаліст вищої категорії,
старший учитель;

Лавров Володимир Дмитрович, керівник
гуртка Комунального закладу «Харківська
обласна Мала академія наук Харківської
обласної ради»

АКУСТИЧНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ВІТРУ

Колесников Назар Євгенович; Харківське територіальне відділення МАН України; Комунальний заклад «Харківська обласна Мала академія наук Харківської обласної ради»; комунальний заклад «Харківський ліцей № 150 Харківської міської ради»; 9 клас; м. Харків;

Шутова Світлана Іллівна, учитель фізики комунального закладу «Харківський ліцей № 150 Харківської міської ради», спеціаліст вищої категорії, учитель-методист;

Молоткова Ірина Ігорівна, учитель інформатики комунального закладу «Харківський ліцей № 150 Харківської міської ради», спеціаліст вищої категорії, старший учитель;

Лавров Володимир Дмитрович, керівник гуртка Комунального закладу «Харківська обласна Мала академія наук Харківської обласної ради»

У дослідницькій роботі розглянуто проблему удосконалення методики акустичного визначення швидкості вітру для її застосування в ультразвукових анемометрах, у т.ч. і тих, що використовуються в дослідженнях громадянської науки.

Дана проблема є актуальною через необхідність задоволення потреб досліджень громадянської науки доступними та надійними приладами метеорологічного контролю, не складними в виготовленні, налаштуванні та експлуатації.

Для реалізації дослідницької мети визначені такі завдання: збір, опрацювання та аналіз матеріалу щодо акустичних методів визначення швидкості вітру, їх доопрацювання, розробка та виготовлення макету пристрою для перевірки працездатності доопрацьованої методики, випробування макету.

У роботі з'ясовано особливості застосування ультразвуку для визначення швидкості та напрямку вітру. У вступній частині роботи визначено проблему, що досліджується, об'єкт та предмет дослідження, обґрунтовано його актуальність, сформульовано мету та завдання дослідження, вказано методи дослідження, новизна, практичне значення та інформація про особистий вклад автора.

У першому розділі виконано опрацювання зібраного матеріалу, щодо акустичних методів визначення швидкості вітру, узагальнено досвід зі створення ультразвукових анемометрів. 2 та 3 розділі роботи присвячені створенню акустичного методу визначення швидкості вітру, розробці та випробуванню макета для перевірки працездатності створеного методу.

В результаті виконаного дослідження створено ефективний акустичний метод визначення швидкості та напрямку вітру, застосування якого передбачає використання доступних компонентів, відкритого програмного забезпечення.

Автор приходить до висновку, що дослідження має практичне значення і анемометри, побудовані за цією методикою не будуть вимагати складних налаштувань, будуть простими в застосуванні, можуть бути інтегрованими до сучасних інформаційних мереж, матимуть попит, особливо в громадянських дослідженнях.

Ключові слова: ультразвуковий анемометр, ультразвукові хвилі, вектор швидкості вітру, метеорологія, акустичний метод вимірювання параметрів вітру

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО АНЕМОМЕТРИ.....	8
1.1. Загальна інформація.....	8
1.2. Анемометр. Основні відомості	10
1.3. Теоретичні основи ультразвукової анемометрії	16
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА АКУСТИЧНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ ПОВІТРЯНИХ МАС	19
2.1. Технічні вимоги до методу.....	19
2.2. Доопрацювання існуючої методики здійснення вимірів вітру ультразвуковими анемометрами	19
2.3. Рекомендації щодо будови анемометра, призначеного для використання акустичного методу.....	21
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА ВИПРОБУВАННЯ ДЕМОНСТРАЦІЙНОГО МАКЕТУ	24
3.1. Загальна інформація.....	24
3.2. Розробка електричної схеми макета.....	25
3.3. Розробка програмного забезпечення.....	26
3.4. Випробування демонстраційного макета.....	27
ВИСНОВКИ.....	29
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	30
ДОДАТКИ.....	33

ВСТУП

Сучасні технології в галузі метеорології вийшли на якісно новий рівень. Вивчення погодних явищ тепер здійснюється не тільки на метеорологічних станціях, але й в звичайних побутових умовах [19]. Цьому сприяє розвиток громадянської науки (англ. *Citizen science*) [28]. Вона засновується на проведенні наукових досліджень, експериментів в різних наукових галузях, учасниками яких стають добровольці, багато з яких навіть не мають наукової освіти та серйозної підготовки [28]. Ними керує ентузіазм, цікавість, пристрасть.

Громадянська наука являє собою не тільки участь в опитуваннях, тестування обладнання, але й те, що учасник сам займається науковою працею в тому чи іншому вигляді. Так, за допомогою смартфона або планшета аматор може визначити, наприклад, характеристики різних метеорологічних явищ. У більшості випадків для цього необхідно встановити спеціальну програму, яка б запускала обчислення, обробляла масиви даних, які поступають у пристрій. Для отримання цих даних не обов'язково використовувати дороге обладнання, яке застосовують професіонали. Велика кількість обладнання може бути створена в домашніх умовах, тим самим зменшується його вартість та збільшується його доступність.

Потреба в прогнозуванні погоди, визначенні швидкості та напрямку вітру існує не тільки в науковій діяльності, це важлива умова й у звичайному житті. Так, наприклад, затребувана ця послуга у службах при аеропортах, у військовій справі, у метро й навіть у деяких видах спортивної діяльності, де враховується швидкість вітру. Важливе значення визначення швидкості та напрямку вітру має для фермерських господарств. Найбільш ефективним та точним способом визначення швидкості вітру є використання анемометра [1].

Об'єкт дослідження – прилади метеорологічного контролю.

Предмет дослідження – акустичний метод визначення швидкості руху повітряних мас, у т. ч. і вітру.

Актуальність дослідження визначається необхідністю створення недорогих приладів метеорологічного контролю для використання в умовах розвитку

громадянської науки, у системах моніторингу повітря, визначення швидкості вітру, прогнозуванні погодних умов, а також можливості виготовлення таких приладів власними руками з доступних матеріалів та компонентів.

Метою дослідження стало доопрацювання існуючого акустичного методу визначення швидкості руху повітряних мас, визначення його напрямку для створення дешевого сучасного ультразвукового анемометра з використанням доступних компонентів та програмного забезпечення; побудова та випробування макета пристрою для демонстрації працездатності цього методу.

Для досягнення мети необхідно виконати наступні **завдання**:

1. Вивчити та проаналізувати інформацію щодо об'єкта та предмета дослідження, досягнення передового досвіду в цьому питанні;
2. Провести доопрацювання існуючих методів визначення швидкості та напрямку руху повітряних мас з метою спрощення конструкції та електричної схеми анемометра, застосування готових вузлів та електронних компонентів, відкритого програмного забезпечення, забезпечення можливості виготовлення приладу в домашніх умовах;
3. Виконати розробку макета акустичного пристрою для демонстрації працездатності доопрацьованого акустичного методу визначення швидкості вітру (конструкцію, електричну схему, програмне забезпечення);
4. Виготовити макет акустичного пристрою;
5. Здійснити випробування макета;

Для вирішення цих завдань на теоретичному та емпіричному рівнях дослідження використані наступні **методи**:

1. Аналіз.
2. Моделювання.
3. Вимірювання.
4. Спостереження.

У рамках дослідження виконано доопрацювання акустичного методу визначення швидкості та напрямку руху повітряних мас, яке дозволило, у порівнянні з існуючими методами, застосувати дешеві та доступні компоненти, використати відкрите

безкоштовне програмне забезпечення Arduino IDE і, як наслідок, отримати можливість бути реалізованим у власноруч виготовлених анемометрах. Метод базується на використанні платформи Arduino та плати ультразвукових датчиків HC-SR04, які серійно виготовляються промисловістю.

Працездатність та ефективність прийнятих технічних рішень перевірено на діючому демонстраційному макеті.

Дослідження носить прикладний характер і має практичне значення. Його результати можуть бути використані для побудови ультразвукових анемометрів для використання в системах громадянського метеорологічного моніторингу.

Новизна дослідження полягає в подальшому розвитку акустичних методів визначення швидкості та напрямку руху повітряних мас шляхом використання платформи Arduino, безкоштовного програмного середовища Arduino IDE, односпрямованої схеми вимірювання часу проходження акустичного сигналу.

Особистий вклад автора полягає в розробці методики акустичного вимірювання, створенні та випробуванні демонстраційного макета.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО АНЕМОМЕТРИ

1.1. Загальна інформація

Під анемометрією (від грецьк «анемо...» – вітер і «...метрія» – вимірювать)[23] зазвичай мають на увазі частину практичної метеорології, що займається вимірюванням швидкості вітру [7].

Вітер – це сукупність горизонтальних рухів повітря відносно земної поверхні. Він виникає внаслідок нерівномірного розподілу атмосферного тиску над різними територіями. Через нерівномірний розподіл тиску по вертикалі й горизонталі повітря рухається під певний кут до земної поверхні. Цей кут дуже малий, що дає змогу нехтувати вертикальним рухом повітря та розглядати лише горизонтальну складову. У метеорологічних спостереженнях враховується лише горизонтальна складова вітру [27].

Вітер є векторною величиною, яка характеризується двома параметрами: швидкістю та напрямком руху [27].

Швидкість вітру визначається у метрах на секунду (м/с) або в кілометрах на годину (км/год). Крім того, існує шкала Бофорта (див. табл. 1.1) – дванадцятибальна шкала, прийнята Всесвітньою метеорологічною організацією для наближеної оцінки швидкості вітру за його дією на наземні предмети або за хвилюванням у відкритому морі. Середня швидкість вітру вказується на стандартній висоті 10 м над відкритою рівною поверхнею [26].

Шкала розроблена англійським адміралом Ф. Бофортом у 1806 році. Із 1874 року прийнята для використання в міжнародній синоптичній практиці [26].

Для визначення напрямку вітру розрізняють вісім основних румбів горизонту (північ, північний схід, схід, південний схід, південь, південний захід, захід, північний захід) і вісім проміжних румбів (Рис. 1.1) [13].

**Таблиця співвідношень між балами Бофорта,
швидкістю вітру і його дією на суші**

Бали Бофорта	Словесне визначення сили вітру	Середня швидкість вітру, м/с (км/г)	Дія вітру на суші
1	2	3	4
0	Штиль	0–0,2 (<1)	Затишшя. Дим піднімається вертикально, листя дерев нерухоме
1	Тихий	0,3–1,5 (1–5)	Напрямок вітру помітний по віднесенню диму, але не по флюгеру
2	Легкий	1,6–3,3 (6–11)	Рух вітру відчувається обличчям, шелестить листя, приводиться в рух флюгер
3	Слабкий	3,4–5,4 (12–19)	Листя і тонке гілля дерев весь час колишеться, вітер розвиває легкі прапори
4	Помірний	5,5–7,9 (20–28)	Вітер піднімає пил і сміття, приводить у рух тонкі гілки дерев
5	Свіжий (холоднуватий)	8,0–10,7 (29–38)	Гойдаються тонкі стовбури дерев, рух вітру відчувається рукою
6	Сильний	10,8–13,8 (39–49)	Гойдаються товсті суччя дерев, гудуть телеграфні дроти
7	Міцний	13,9–17,1 (50–61)	Гойдаються стовбури дерев
8	Дуже міцний	17,2–20,7 (62–74)	Вітер ламає суччя дерев, йти проти вітру дуже важко

Продовж. табл. 1.1

1	2	3	4
9	Шторм	20,8–24,4 (75–88)	Невеликі пошкодження, вітер починає руйнувати дахи будинків
10	Сильний шторм	24,5–28,4 (89–102)	Значні руйнування будівель, вітер викориняє дерева
11	Жорстокий шторм	28,5–32,6 (103–117)	Великі руйнування на значному просторі. Спостерігається дуже рідко.
12	Ураган	> 32,6 (> 117)	Учиняє спустошливу дію

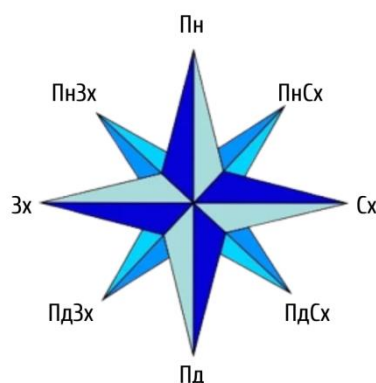


Рис. 1.1 Напрямки вітру [13]

1.2. Анемометр. Основні відомості

Анемометр або вітромір – це метеорологічний прилад, який використовується для вимірювання швидкості повітряного потоку, у тому числі і вітру [9].

Перший анемометр був винайдений приблизно 1540 р. в Італії математиком Леоном Батистом Альберті [7].

У наш час анемометри представлені як цифрові або електронні прилади. Деякі сучасні моделі, крім виміру усередненої швидкості вітру за період, здатні також

фіксувати напрям вітру, об'ємну витрату повітря, вологість, температуру й тиск, стаючи, отже, портативною метеостанцією [12].

Розрізняють кілька видів анемометрів, у залежності від їхніх конструктивних особливостей та принципу дії [9]:

- чашковий анемометр (Рис. 1.2, Рис. 1.3);
- крильчастий (пелюстковий) анемометр (Рис. 1.4, Рис. 1.5);
- ультразвуковий анемометр (Рис. 1.6) тощо

Існують також й інші, менш поширені види, - пневмоанемометри або теплові анемометри. Вони практично не використовуються або застосовуються тільки у вузьких областях, наприклад, у вузько лабораторних умовах. Сучасні пристрої укомплектовуються рідкокристалічним дисплеєм, на якому відображаються результати вимірювань. Також є можливість вибору одиниць вимірювання, функція підключення пристрою до комп'ютера [10].

1.2.1. Чашковий анемометр

Найпершим і найпростішим пристроєм для вимірювання швидкості вітру є чашковий анемометр. Він був винайдений в 1846 році інженером Джоном Робінсоном. Свою назву отримав завдяки формі лопатей (пелюстків) у вигляді напівсфер, які схожі на чашки [14].

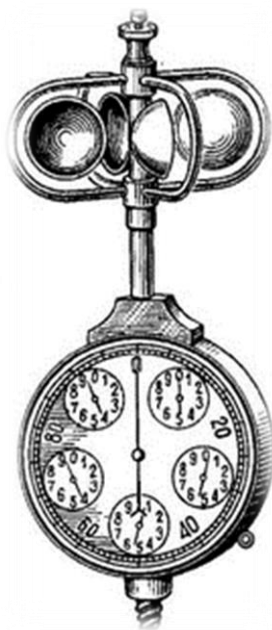


Рис. 1.1 Чашковий анемометр [14]

Спочатку чашковий анемометр складався із чотирьох напівсферичних чашок, які симетрично насаджувались на хрестоподібні спиці ротора та обертались у вертикальній площині. Саме це обертання, а точніше, його швидкість, і були критерієм визначення показань цього типу анемометра [14].

Звісно, згодом ця конструкція була вдосконалена. Канадський учений Джон Паттерсон у 1926 року запропонував прибрати одну чашку, зробивши анемометр трипелюстковим. У 1935 році фізики Бреворт та Джойнер, завдяки удосконаленню форми чашок, покращили точність вимірювань. Тому похибка, що отримується при вимірах сучасними чашковими анемометрами, не перевищує 3% [14].

У 1991 році австралійцем Дерекком Вестоном було запропоновано оригінальне удосконалення чашкової конструкції, яке дозволяє за допомогою того ж ротора визначати не тільки швидкість, а й напрямок вітру[14].

Найпоширенішими сучасними моделями чашкових анемометрів є МС12, М 95ЦМ, а також анемометр АРЕ (Рис. 1.3).

а



б)



Рис. 1.2. Чашкові анемометри : а) (М 95ЦМ) [21], б) (АРЕ-М) [20]

У наш час, крім метеорологічних вимірювань, чашкові анемометри дуже часто застосовуються при проведенні висотних будівельних робіт.

1.2.2. Крильчатий (пелюстковий) анемометр

Крильчатий анемометр (Рис. 1.4) з'явився в результаті еволюції та розвитку чашкового анемометра [24].

Зовні він нагадує флюгер. Такий анемометр так само, як і флюгер, залежно від напрямку вітру, може змінювати свій напрямок, ніби стаючи впродовж нього. Відмінність крильчатого анемометра від чашкового полягає в тому, що деталь, яка вловлює швидкість вітру, виконана у формі вентилятора, а не у вигляді чашок. Пелюстки, які закріплюються на кінцях анемометра, обертаються зі швидкістю, пропорційною швидкості вітру. Його перевагою є те, що, крім швидкості повітряного потоку, він може визначити напрямок вітру [24].

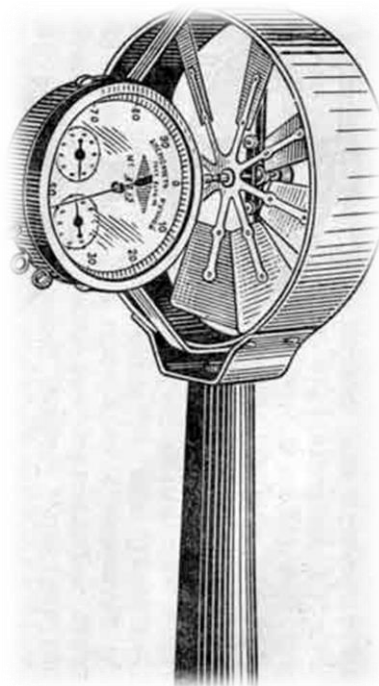


Рис. 1.3. Крильчатий (пелюстковий) анемометр [24]

Найбільш поширеними крильчастими анемометрами є такі[8]:

- анемометр Testo 416;
- анемометр ІСП–МГ4;
- анемометр АПР–2 (Рис. 1.5)

Для вимірювання швидкості спрямованого повітряного потоку в трубопроводах і коробах вентиляційних пристроїв, також для обчислення розходу вентиляційного

повітря у вентиляційних отворах, повітропроводах житлових і виробничих будівель застосовуються ручні крильчасті анемометри [24].

а)



б)



Рис. 1.4. Крильчасті анемометри: а) (Testo 416) [8], б) (АПР2) [6]

1.2.3. Ультразвукові анемометри

Ультразвуковий анемометр, у порівнянні з першими двома видами анемометрів, більш сучасний. Найчастіше використовується для інтеграції в системи автоматики [17]. Він вигідно відрізняється точністю вимірів (які фіксуються в реальному часі), простим застосуванням, у його конструкції відсутні рухомі частини, і він здатний виявити навіть незначні коливання вітру [4].

Існують двокомпонентні ультразвукові анемометри, які вимірюють, крім швидкості, й напрям вітру частинами світу, ще й напрям горизонтального вітру. Трикомпонентні ультразвукові анемометри є вимірювачами всіх трьох компонентів вектора швидкості повітря [3].

Останнім часом зростає популярності такого типу анемометрів.

В якості прикладів такого обладнання можна навести анемометри:

- Gill Instruments WindMaster Pro

Технічні характеристики:

- Діапазон вимірювання швидкості вітру: 0 до 45 м/с.
- Точність: $\pm 2\%$ від знятої величини.
- Роздільна здатність: 0.01 м/с.
- Вимірювання напрямку вітру: 0 до 359° без мертвих зон.

- Точність вимірювання напрямку: $\pm 2^\circ$.
- Частота вимірювань: до 20 Гц [5].

а)



б)



Рис. 1.5. Ультразвукові анемометри:

а) R.M. Young 81000 Sonic Anemometer [2], б) WindSonic SDI-12 [18]

- R.M. Young 81000 Sonic Anemometer

Технічні характеристики:

- Діапазон вимірювання швидкості: 0 до 60 м/с.
- Точність вимірювання швидкості: $\pm 4\%$ від знятої величини.
- Діапазон вимірювання напрямку: 0 до 359° .
- Точність вимірювання напрямку: $\pm 3^\circ$.
- Діапазон робочих температур: від -40° до $+60^\circ\text{C}$ [2].

- WindSonic SDI-12

Технічні характеристики:

- Діапазон роботи від 0 до 60 м/с
- Точність $\pm 2\%$ (при 12 м/с)
- Роздільна здатність 0,01 м/с
- Час відгуку 0,25 с
- Порогове значення 0,01 м/с
- Діапазон роботи від 0° до 359° (без мертвих зон)
- Точність $\pm 1^\circ$

- Роздільна здатність 1° [18]

Саме на удосконалення такого виду анемометрів і спрямоване дане дослідження.

1.3. Теоретичні основи ультразвукової анемометрії

Незважаючи на різницю в конструктивному виконанні, певних розбіжностей в обсязі виконання функцій, побудови схем руху ультразвукового сигналу [10], принцип дії більшості ультразвукових анемометрів заснований на використанні методики, суть якої зрозуміла з Рис. 1.7.

Швидкість звуку в таких анемометрах визначається за часом проходження ультразвукових імпульсів фіксованої відстані між випромінювачем та приймачем ультразвукового сигналу, потім виміряний час перераховується у два або три компоненти швидкості руху повітря [10].

На Рис. 1.7 надана схема роботи двоканального ультразвукового анемометра.

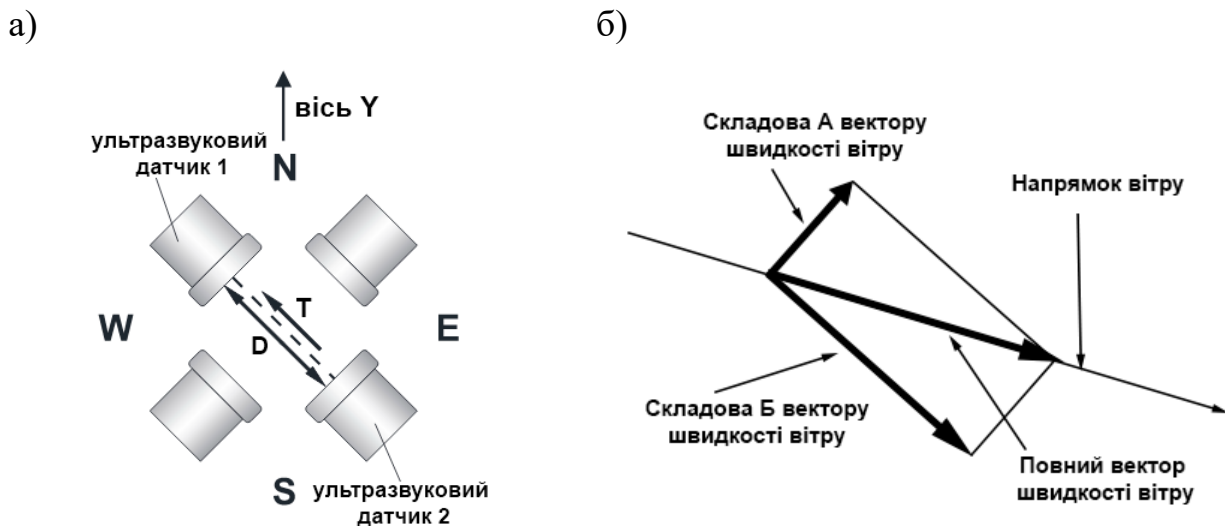


Рис. 1.6. Схема роботи ультразвукового анемометра [4]

Два канали розповсюдження ультразвуку, утворені двома парами спрямованими назустріч один одному, п'єзоелектричних перетворювачів, які розташовані перпендикулярно один до одного в одній горизонтальній або вертикальній площині.

П'єзоперетворювачі по чергові виконують функції приймача та випромінювача ультразвукового сигналу.

Коли напрямок розповсюдження ультразвукових хвиль співпадає з напрямком вітру, час проходження ультразвуку між п'єзоелектричними перетворювачами може бути розрахованим за формулою:

$$t_a = \frac{D}{c + V_w} \quad (1.1)$$

де t_a – час проходження ультразвукових імпульсів;

D – відстань між двома ультразвуковими датчиками;

c – віртуальна швидкість звуку (без впливу вітру);

V_w – швидкість вітру;

Коли напрямок розповсюдження ультразвукових хвиль спрямований протилежно напрямку вітру, розрахунки робляться за формулою:

$$t_R = \frac{D}{c - V_w} \quad (1.2)$$

Швидкість вітру, виходячи з формул (1.1) та(1.2):

$$V_w = \frac{D}{2} * \left(\frac{1}{t_a} - \frac{1}{t_R} \right) \quad (1.3)$$

Таким чином, зафіксувавши час проходження ультразвукового сигналу в прямому та протилежному напрямку, можна визначити складові вектора швидкості вітру, які впливають на рух ультразвуку по одному та по другому каналу (складова А та складова Б). Далі, користуючись правилами складання векторних величин, можна отримати значення та напрямок результуючого повного вектора швидкості вітру.

Дана методика дозволяє визначити величину та напрямок руху повітряних мас без урахування віртуальної швидкості ультразвуку, яка в значній мірі залежить від зовнішніх факторів (особливо температури). Разом з тим, вона потребує застосування спеціальної електричної схеми, яка б дозволяла в автоматичному режимі змінювати напрямок випромінювання ультразвукових хвиль (або використовувати подвійну кількість п'єзоелектричних перетворювачів). Це значно ускладнює застосування

готових технічних рішень, наприклад, необхідне використання плати ультразвукових датчиків HC-SR04 [16].

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА АКУСТИЧНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ ПОВІТРЯНИХ МАС

2.1. Технічні вимоги до методу

Метод призначений для застосування в ультразвукових анемометрах і розрахований для використання в умовах Харківського регіону.

Умови здійснення вимірів – відкрите повітря, на висоті 10м від рівня землі, температура від: -20°C до $+40^{\circ}\text{C}$, атмосферний тиск: 100 – 104 кПа, вологість – до 80%.

Швидкість вітру, що вимірюється, – від 0 до 45 м/с в горизонтальній площині (методика повинна забезпечувати вимірювання 2–х компонентів вектора швидкості).

Напрямок вітру, що вимірюється, – від 0 до 359° .

Методика повинна передбачати можливість використання плати контролера Arduino, плати ультразвукових датчиків HC-SR04 та відкритого програмного середовища Arduino IDE.

Крім вимірювання швидкості та напрямку вітру, методика повинна передбачати вимірювання температури та вологості навколишнього повітря у реальному часі.

Методика повинна передбачати відображення результатів вимірювання (обчислення) параметрів повітря, можливість інтегрування анемометра до інформаційних мереж.

2.2. Доопрацювання існуючої методики здійснення вимірів вітру ультразвуковими анемометрами

У зв'язку з тим, що вологість та тиск не справляють значного впливу на швидкість розповсюдження ультразвуку в повітрі [13], для виконання інженерних розрахунків по визначенню віртуальної швидкості ультразвуку c в м/с можна застосувати наступну формулу [22]:

$$c = \sqrt{(jR_{\text{пов}} (t + 273,15))} = \sqrt{402,08(t + 273,15)} \quad (2.1)$$

де $R_{\text{пов}} = 287,2$ Дж/(кг*К) – індивідуальна газова стала для повітря.

j – показник адіабати (для повітря 1,4);

t – поточна температура повітря;

Таким чином, вимірявши температуру повітря за формулою 2.1, можна розрахувати віртуальну швидкість ультразвуку при такій температурі.

Реальну швидкість розповсюдження ультразвукових хвиль у просторі V_c між двома п'єзоелектричними перетворювачами можна визначити за формулою [11]:

$$V_c = \frac{D}{T} \quad (2.2)$$

де D – відстань між п'єзоелектричними перетворювачами, м;

T – час проходження ультразвуку відстані D , с;

Виходячи з формул (1.1.), (1.2.) та (2.2.):

$$c \pm V_w = \frac{D}{T} \quad (2.3)$$

Звідкіля швидкість вітру може бути визначена:

$$\pm V_w = \frac{D}{T} - c \quad (2.4)$$

У разі, коли розрахунки, які отримані за формулою (2.4) мають від'ємне значення ($V_w < c$), напрямок вітру не співпадає з напрямком розповсюдження ультразвуку, якщо – позитивне ($V_w > c$), вітер співпадає з напрямком розповсюдження ультразвуку.

Отже, для отримання даних про значення швидкості та напрямку вітру за доопрацьованою методикою, достатньо виміряти температуру навколишнього середовища та час розповсюдження ультразвуку по кожному із каналів окремо. Далі, виконавши необхідні розрахунки за формулами (2.1), (2.4), отримаємо значення

складової вектора швидкості по кожному з каналів. Їх напрямок визначається шляхом аналізу отриманих за формулою 2.4 результатів (більше чи менше вони від 0).

Визначення параметрів (значення та напрямку) загального вектора швидкості вітру здійснюється за аналогією з діючою методикою, яка описана у розділі 1, шляхом складання двох, отриманих у результаті розрахунку векторів.

Методика розрахована на використання платформи Arduino, яка функціонує в програмному середовищі Arduino IDE, та плати ультразвукового дальноміру HC–SR04.

2.3. Рекомендації щодо будови анемометра, призначеного для використання акустичного методу

Методика розрахована на використання платформи Arduino (зокрема плати Arduino UNO, Рис. 2.1), яка запрограмована в програмному середовищі Arduino IDE, та двох плат ультразвукових датчиків HC–SR04.

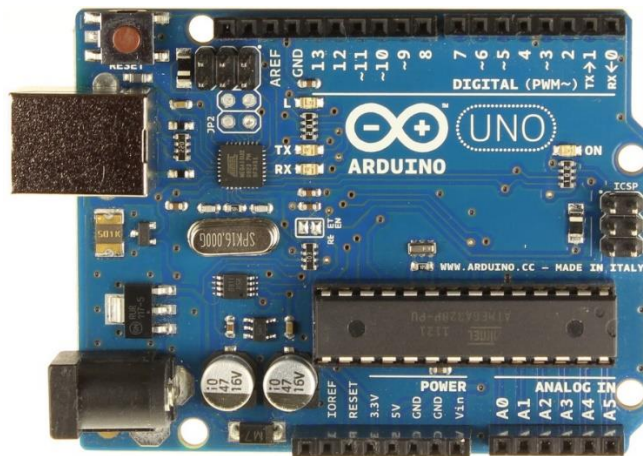


Рис. 2.1. Плата контролера Arduino UNO [25]

Плата Arduino UNO(Рис. 2.1) має наступні технічні характеристики [25]

- Мікроконтролер: ATmega328
- Робоча напруга: 5В
- Напруга живлення (рекомендована): 7–12В
- Напруга живлення (гранична): 6–20В

- Цифрові входи/виходи: 14 (з них 6 можуть використовуватися як ШИМ–виходи)
- Аналогові входи: 6
- Максимальний струм одного виводу: 40 мА
- Максимальний вихідний струм виведення 3.3V: 50 мА
- Flash–пам'ять: 32 КБ (ATmega328), з яких 0.5 КБ використовуються завантажувачем.
- SRAM: 2 КБ (ATmega328)
- EEPROM: 1 КБ (ATmega328)
- Тактова частота: 16 МГц[25]

Розміщення ультразвукових датчиків із комплекту HC–SR04 (Рис. 2.2) повинно здійснюватися на загальному каркасі в одній горизонтальній площині таким чином, щоб вони утворювали два взаємоперпендикулярні канали розповсюдження ультразвуку (Рис. 1.7). Кожна пара датчиків повинна бути спрямована назустріч один одному.



Рис. 2.2. Ультразвуковий датчик відстані HC–SR04 [16]

Технічні характеристики HC–SR04[16]:

- Напруга живлення 5В
- Статичний струм до 2мА
- Ефективний кут $<15^\circ$
- Діапазон виміру відстані 2–450 см
- Максимальна точність датчика 0.3 см



Рис. 2.3. Датчик вологості та температури DHT21 [15]

В якості термодатчика і датчика вологості в анемометрі рекомендується використання DHT21 або DHT22 з наступними технічними характеристиками [15]:

- Виробник: AOSONG
- Тип датчика: DHT21 / AM2301A
- Тип підключення: 3-дротове
- Тип інтерфейсу: цифровий
- Інтерфейс: 1-wire
- Точність: 0.1°C
- Діапазон вимірювання вологості: 0–100%
- Діапазон виміру температури: –40 ~ 80°C
- Точність вимірювання вологості: ± 2% RH
- Точність вимірювання температури: ± 0.5°C
- Калібрування: заводське

Анемометр повинен мати автономне живлення від джерела безперебійного живлення напругою 5 – 9 В із допустимим навантаженням не менш як 1 А.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ТА ВИПРОБУВАННЯ ДЕМОНСТРАЦІЙНОГО МАКЕТА

3.1. Загальна інформація

Перевірку працездатності акустичного методу здійснено на демонстраційному макеті, у якому відтворено роботу одного каналу ультразвукового анемометра з односпрямованим випромінюванням. Що є цілком достатньо, оскільки зміни методу стосуються визначення складових вектору швидкості тільки в межах каналу розповсюдження ультразвуку.

Макетування здійснено з використанням компонентів та рекомендацій, викладених у розділі 2.

Демонстраційний макет зібрано на каркасі ультразвукового анемометра, ультразвуковий канал сформовано двома п'єзоелектричними перетворювачами з комплекту HC-SR04 (Рис. 3.1). Сторона, на якій встановлено випромінювач звукового сигналу (сторона В), помічена міткою.

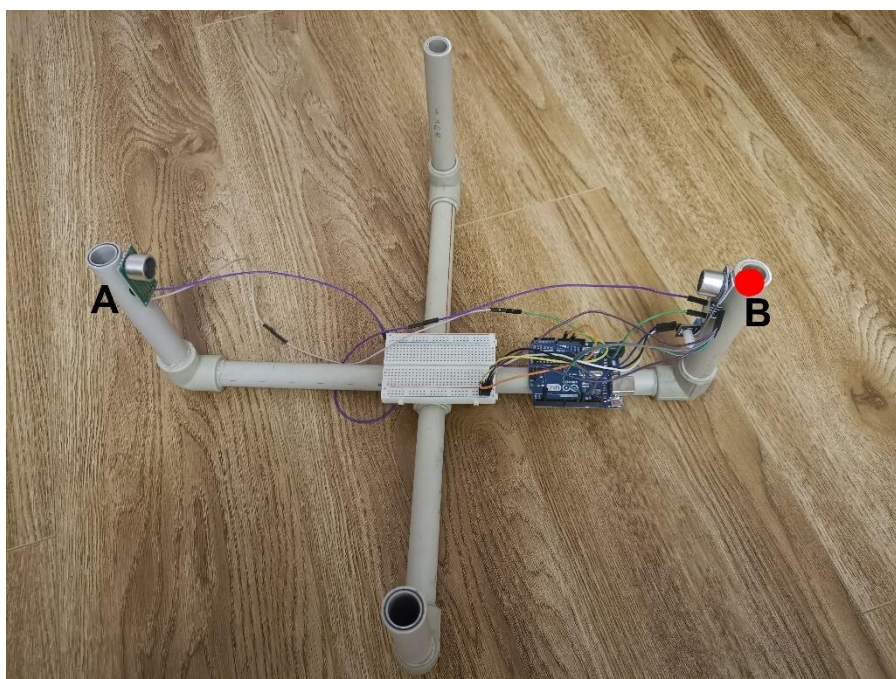


Рис. 3.1. Демонстраційний макет для перевірки працездатності акустичного методу

Рух повітряної маси здійснюється за допомогою побутового фену з живленням від регулятора потужності, який використовується для зміни швидкості руху повітряної маси (в ручному режимі) (Рис. 3.2, Рис. 3.3).

3.2. Розробка електричної схеми макета

Схема електрична принципова макета надана на Рис. 3.4, перелік елементів до неї – в Таблиці 3.1.



Рис. 3.2. Фен для відтворення руху повітряної маси

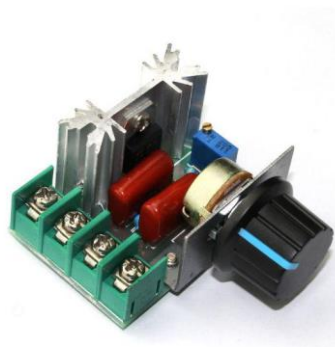


Рис. 3.3. Регулятор потужності (дімер) 2000Вт 220В

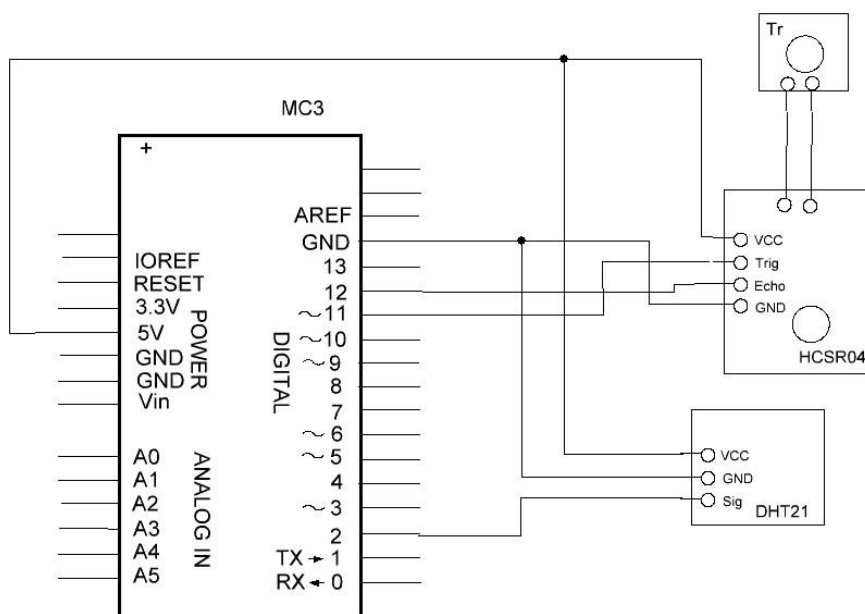


Рис. 3.4. Схема електрична принципова демонстраційного макета

Таблиця 3.1

**Перелік
елементів до схеми електричної принципової демонстраційного макета**

Поз. познач.	Найменування	Кількість
DHT21	Датчик температури та вологості DHT21	1
MC3	Плата мікроконтролера Arduino UNO	1
HC-SR04	Ультразвуковий датчик відстані HC-SR04	1
Tr1	Трансмітер (з комплекту HC-SR04)	1

3.3. Розробка програмного забезпечення

В якості програмованого елемента в макеті використана плата Arduino UNO на базі мікроконтролера Atmega328.

Програмування виконано в безкоштовному програмному середовищі Arduino IDE.

Код програми надано в Додатку А.

3.4. Випробування демонстраційного макета

Схема руху звукового сигналу в макеті надана на Рис. 3.5

Результати вимірювань та розрахунків відображаються в моніторі порту Arduino IDE (Рис. 3.6).

Результати випробувань надані в Таблиці 3.2 та Таблиці 3.3.

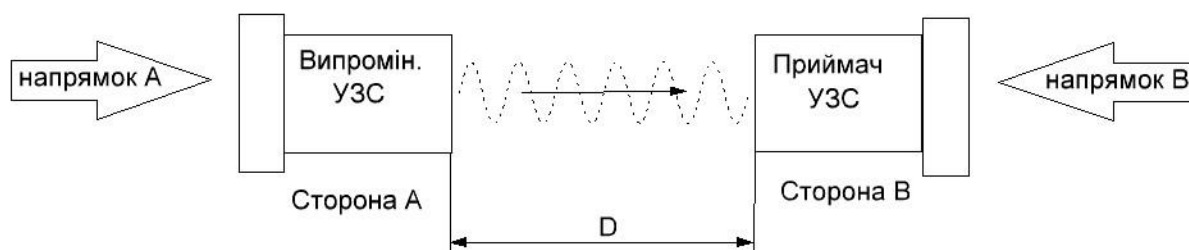


Рис. 3.5. Схема руху УЗС (ультразвукового сигналу) у макеті

Таблиця 3.2

Результати випробування макета при рухові повітря з напрямку А

D, м	Напруга на виході дімера, %	T, мкс	t, °C	C, м/с	V _c , м/с	V _w , м/с
0,33	25	957	25.40	346,4	345.2	-1,2
0,33	50	959	25.40	346,4	343,9	-2,5
0,33	75	960	25.40	346,4	342,8	-3,6
0,33	100	961,4	25.40	346,4	341,4	-5

Отримані дані повністю підтверджують працездатність методики та можливість її застосування за призначенням.

Таблиця 3.3

Результати випробування макета при рухові повітря з напрямку В

D, м	Напруга на виході дімера, %	T, мкс	t, °C	C, м/с	V _c , м/с	V _w , м/с
0,33	25	949	25.40	346,4	347,7	1,3
0,33	50	946	25.40	346,4	348,8	2,4
0,33	75	942	25.40	346,4	350,1	3,7
0,33	100	940,7	25.40	346,4	351,2	4,8

ВИСНОВКИ

Завдання дослідження виконано в повному обсязі.

В результаті дослідження створено акустичну методику вимірювання швидкості та напрямку вітру, особливістю якої є застосування односпрямованої одноканальної схеми вимірювання та використання доступною платформи Arduino.

Випробування макету пристрою, побудованого за цією методикою підтвердило працездатність прийнятих технічних рішень, ефективну роботу пристрою у складі програмного комплексу.

Результати дослідження мають практичне значення та можуть бути застосовані для побудови ультразвукових анемометрів, виготовлення яких не потребує складних технологій та високої кваліфікації, що набуває особливого значення в сучасних умовах бурхливого розвитку громадянської науки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. J.G.(Джей Джи).Чим вимірюють швидкість вітру? URL: <https://dovidka.biz.ua/chim-vimiryuyut-shvidkist-vitru/> (дата звернення: 12.08.2023);
2. RM Young 81000 – Ultrasonic Anemometer – 3 Axis with Voltage and Serial Output. URL: https://www.scaledinstruments.com/shop/shop-by-category/anemometer/rm-young-81000-ultrasonic-anemometer-3-axis-with-voltage-and-serial-output/?gad_source=1 (дата звернення: 01.10.2023);
3. Ultrasonic Anemometer. URL: <https://www.rivaditraiano.com/2019/02/26/anemometro-a-ultrasuoni/?lang=en> (дата звернення: 12.09.2023);
4. Vermeulen M.J.M., Drenthen J.G., den Hollander H.Understanding Diagnostic and Expert Systems in Ultrasonic Flow Meters.[(accessed on 12 March 2015)]. URL: <http://asgmt.com/paper/understanding-diagnostic-and-expert-systems-in-ultrasonic-flow-meters-2012/> (дата звернення: 12.09.2023);
5. WindMaster 3-axis ultrasonic anemometers. URL: <https://gillinstruments.com/compare-3-axis-anemometers/windmaster-3axis/> (дата звернення: 28.09.2023);
6. Анемометр АПР2. URL: <http://apr-2.com.ua/apr-2.html> (дата звернення: 25.09.2023);
7. Анемометр.Що таке анемометр? URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BD%D0%B5%D0%BC%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80> (дата звернення: 15.08.2023);
8. Анемометри.Testo 416 крильчастий анемометр. URL: https://chemtest.com.ua/ua/testo_416_anemometr_krilchatij_teleskopchnijj (дата звернення: 29.09.2023);
9. Анемометри.Для чого використовують анемометри. URL: <https://storgom.ua/ua/novosti/chto-takoe-anemometr-i-chto-im-izmeryayut-vidy-anemometrov-kak-polzovatsya.html> (дата звернення: 24.08.2023);
10. Анемометри.Що таке анемометри.Ультразвукові анемометри.Експлуатація. URL: <https://interfax.com.ua/news/press-release/746243.html> (дата звернення: 22.08.2023);

11. Бар'яхтар В., Довгий О., Божинова Я., Горобець Ю., Ненашев І., Кірюхіна О. Підручник Фізика 7 клас Бар'яхтар / Харків: Вид-во «Ранок», 2020. 256 с.
12. Вимірювач вітру у вас вдома: що потрібно знати. URL: <https://pershyj.com/p-vimiryuvach-vitru-u-vas-vdoma-scho-potribno-znati-45260> (дата звернення: 07.09.2023);
13. Галаган Р.М. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/27002?locale=uk> (дата звернення: 12.09.2023);
14. Гігієна. Визначення швидкості руху повітря. Чашковий анемометр. URL: <https://medical-enc.com.ua/opredelenie-skorosti-dvizheniya-vozduha.htm> (дата звернення: 14.08.2023);
15. Датчик вологості та температури DHT21/AM2301A.ARDUINO.UA. URL: <https://arduino.ua/ru/prod1683-datchik-vlajnosti-i-temperatyri-dht21am2301> (дата звернення: 18.09.2023);
16. Датчики. Відстань. Ультразвуковий датчик. URL: <https://www.mini-tech.com.ua/datchik-rasstoyaniya-ultrazvukovoy-hc-sr04> (дата звернення: 02.09.2023);
17. Екологія. Ультразвуковий анемометр. URL: https://pidru4niki.com/80321/ekologiya/ultrazvukoviy_anemometr (дата звернення: 27.09.2023);
18. Каталог. Анемометри. Windsonic. URL: <http://www.demetra5.kiev.ua/ru/catalog/anemometer/windsonic/2?search=> (дата звернення: 27.09.2023);
19. На зв'язку. Поняття про ультразвук. URL: https://na-zvayzky.blogspot.com/p/blog-page_56.html (дата звернення: 03.09.2023);
20. Продукція. Деталі. Анемометр АРЕ-М. URL: <http://proflab.com.ua/produkt/product-details/1442-anemometr-ruchnoj-elektronnyj-are-m-0-3-35m-s.html> (дата звернення: 29.09.2023);
21. Продукція. Деталі. Анемометр М 95ЦМ. URL: <http://proflab.com.ua/produkt/product-details/249-anemometr-m-95-cm.html> (дата звернення: 28.09.2023);

22. Система моніторингу параметрів вентиляції. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/31282/1/Bosenko_magistr_2019_2.pdf (дата звернення: 28.09.2023);
23. Словник іншомовних слів Мельничука. URL: <https://126.slovaronline.com/1785%D0%90%D0%9D%D0%95%D0%9C%D0%9E%D0%9C%D0%95%D0%A2%D0%A0%D0%86%D0%AF> (дата звернення: 15.09.2023);
24. Теоретичний вступ.Вимірювання швидкості повітря.Крильчастий анемометр. URL: <https://studfile.net/preview/5205564/page:3/> (дата звернення: 14.08.2023);
25. Форум.Плати Arduino.Arduino Uno. URL: <https://doc.arduino.ua/ru/hardware/Uno> (дата звернення: 09.09.2023);
26. Шкала Бофорта. Meteo.UA. URL: <https://meteo.ua/ua/vocabulary/shkala-boforta-299> (дата звернення: 23.09.2023);
27. Що таке анемометр призначення, типи і принцип роботи. Типи анемометрів.Принцип роботи анемометрів. URL: <https://simvolt.ua/shcho-take-anemometr-priznachennya-tipi-i-printsip-roboti/> (дата звернення: 17.08.2023);
28. Ю.Омелянець.Наука як мистецтво.Сам собі дослідник: що таке громадянська наука.Куншт. URL: <https://kunsht.com.ua/articles/sam-sobi-doslidnik-shho-take-gromadnyaska-nauka> (дата звернення: 12.08.2023)

ДОДАТКИ

Додаток А

/* Скетч для діючого макета установки визначення швидкості та напрямку вітру

Модифікація 15 листопада 2023 року, виконана Колесниковим Назаром

- контроль навколишньої температури через задані проміжки часу;
- вимірювання часу проходження ультразвукового сигналу;
- розрахунок значення швидкості вітру;
- визначення напрямку вітру;
- відображення результатів виміру температури, розрахунку швидкості та напрямку вітру в моніторі порту; */

```

1. //об'ява бібліотеки DHT
2. #include <DHT.h>
3. #include <DHT_U.h>
4. #define DEFINE_DISTANCE 0.33 //Дистанція між датчиками в метрах
5. #define DHTPIN 2 // Вивід датчика DHT підключений до другого піну (D2)
6. #define DHTTYPE DHT21 // активуємо DHT 21
7. #define TrigPin 11 //вивід Trig HC-SR04 підключений до піну 11
8. #define EchoPin 12 //вивід Echo HC-SR04 підключений до піну 12
9. float T; // час проходу ультразвукового сигналу
10.DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE); // підготовка датчика DHT для зчитування
    //інформації
11.void setup() {
12.// put your setup code here, to run once:
13.Serial.begin(9600); // встановлюємо швидкість обміну даними з комп'ютером
14.Serial.println("DHT21 test!");// відображення " DHT21 test!" в моніторі порту в
    //стопчик
15.dht.begin();// даємо старт бібліотеці DHT
16.pinMode(TrigPin, OUTPUT);// вивід 11 – вихід

```

```

17.pinMode(EchoPin, INPUT); //вивід 12 – вхід
18.}
19.void loop() {
20.delay(10000);//пауза 10 сек
21.float h = dht.readHumidity(); // зчитування вологості
22.float t = dht.readTemperature(); // зчитування температури в градусах Цельсія
23.// перевіряємо чи немає помилок
24.if (isnan(h) || isnan(t)) {
25.Serial.println("Не вдалося зчитати з датчика ДНТ!");//виводимо в монітор порту «Не
    //вдалося зчитати з датчика ДНТ!»
26.return; //повертаємось до початку циклу
27.}
28.float c = sqrt(402.08 * (t + 273.15)); // Розраховуємо c, м/с
29.digitalWrite(TrigPin, LOW); //формуємо 0 на виводі Trig HC–SR04
30.delayMicroseconds(5); // пауза 5 мкс
31.digitalWrite(TrigPin, HIGH); // подаємо високий рівень сигналу на Trig HC–SR04
32.delayMicroseconds(10); // витримуємо 10 мкс
33.digitalWrite(TrigPin, LOW); // високий рівень на 11 піні вимикається
34.T = pulseIn(EchoPin, HIGH); // фіксуємо час проходження сигналу відстані D на 12
    //пін мкс
35.float Vc = (DEFINE_DISTANCE * 1000000) / T; //Розраховуємо реальну швидкість
    //звуку
36.float Vw = Vc – c; //Знаходимо швидкість вітру
37.Serial.print(" Vw: ");
38.Serial.print(Vw, 5);
39.Serial.print(" м/с");
40.//Визначаємо напрямок вітру, якщо швидкість вітру більше 0.1м/с вітер дме з
    //напрямку B, якщо менше -0.1м/с вітер дме з напрямку A
41.if (Vw > 0.1) {
42.Serial.print(" Напрямок B.");

```

```
43.} else if (Vw < -0.1) {
44.Serial.print(" Напрямок А.");
45.} else {
46.Serial.print(" Вітер відсутній або його напрямок не може бути визначений.");
47.}
48.//Відображаємо температуру та вологість
49.Serial.print(" Температура: ");
50.Serial.print(t);
51.Serial.print(" *C");
52./*Serial.print(" Вологість: ");
53.Serial.print(h);
54.Serial.println(" *%"); */
55.}
```