

**CONTROLLER FOR ULTRASONIC MEASUREMENT
OF WIND SPEED AND DIRECTION****КОНТРОЛЕР ЗА УЛТРАЗВУКОВО ИЗМЕРВАНЕ
НА СКОРОСТ И ПОСОКА НА ВЯТЪРА****Hristo Kilifarev¹**¹ *Technical University of Gabrovo*
*hri.100@gmail.com***Abstract**

The subject of the present work is the development of a controller for measuring wind speed and direction with a four-arm ultrasonic anemometer based on an Arduino platform and ultrasonic distance measurement modules. The aim of the development is the study of the possibility, through the use of relatively cheap components in the system, to implement the functionality of an ultrasonic anemometer with an LCD to display the measurement data. The results of the work could be used for educational purposes as well as a development base in the creation of future developments of similar devices.

Keywords: controller, acoustic anemometer, ultrasonic sensors, measurement of wind speed and direction.

ВЪВЕДЕНИЕ

За бита на човека както и за изследвания в по-широк аспект е нужно да бъдат измервани само някои от основните климатични елементи. С най-голямо значение са: температура на въздуха, атмосферно налягане, относителна влажност на въздуха, скоростта и посоката на вятъра.

Уредите за измерване скоростта и посоката на вятъра се наричат анемометри. Най-общо се разделят на два вида в зависимост дали измерват скоростта или посоката на вятъра, но двата показателя са взаимно свързани.

Според исторически сведения, първият анемометър е създаден през петнадесети век от италианския архитект Леон Батиста Алберти. През изминалите векове, конструкцията им е претърпяла сериозно развитие, разработени са различни видове. Значително е подобрена и точността им.

Конструкцията на анемометъра се състои от три основни части – приемно устройство, вторичен преобразувател и отчитащо устройство.

Приемното устройство е познато още като чувствителен елемент на анемометъра или първичен преобразувател. Вторичният преобразувател представлява механичен, пневматичен или електронен блок, който, преобразува, усилва и предава деформацията на чувствителния елемент към отчитащото устройство. Последното обикновено е във вид на скала, индикатор или дисплей, върху които лесно могат да бъдат отчетени получените резултати.

Групата на анемометрите включва различни като конструкция уреди, които могат да се класифицират на основата на различни признаци. Най-често се систематизират в пет основни групи - механични, манометрични, акустични, оптични и термоанемометри.

Към групата на механичните анемометри се отнасят уреди, работата на които се базира на аеродинамичните сили, възникващи при обтичане на тела със специфична форма с въздушен поток. Сред най-често използваните уреди от тази група са чашковите и крилчатите анемометри.

Манометричните прибори измерват динамичното налягане, което въздушен поток оказва върху течност в специална тръбичка.

Към групата на акустичните анемометри се включват уреди, използващи зависимостта между скоростта на звука и скоростта на въздушния поток.

Работата на оптичните анемометри се основава на т.нар. ефект на Доплер.

При термоанемометрите измерването на скоростта се базира на промените в температурата на нагрятото тяло, зависещи от скоростта на обтичащия го въздушен поток.

Ултразвуковите анемометри са разработени за първи път през 50-те години. Те измерват едновременно скоростта на въздушния поток и посоката му, на базата на разпространението на ултразвукови вълни в него.

За определяне на скоростта на вятъра с помощта на звукови вълни при ултразвуков анемометър се използват 3 типа методи, а именно метод на времевата разлика, методът на фазова разлика и методът на Доплер. Най-използваният метод е методът за разлика във времето, защото има сравнително по-лесно реализиране от другите методи. При измерванията с помощта на методът на времевата разлика изчисляването на скоростта на вятъра е базирано на измереното време на полет на звуковите вълни между двойки преобразуватели.



Фиг. 1. 2D и 3D акустични анемометри

За тази цел анемометърът е оборудван с двойки ултразвукови преобразуватели, разположени едни срещу други. Последователно, всеки преобразувател излъчва ултразвуков сигнал, през въздушния поток с посока към срещуположния преобразувател. Ако посоките на потока и ултразвуковия сигнал съвпадат, сигналът ще премине разстоянието от излъчващия до приемащия преобразувател по-бързо. Съответно, ако потокът има противоположна на сигнала посока, времето ще е по-голямо. Чрез пресмятане на времето, необходимо на звуковия сигнал да до-

стигне до срещуположния преобразувател се определя скоростта на потока. Посоката на въздушния поток се определя в зависимост от ъгъла, под който той пресича ултразвуковите вълни.

Измерванията от двойки преобразуватели могат да се комбинират, за да се получи измерване на скоростта на потока в 1-, 2- или 3-измерното пространство. Разделителната способност в пространството се определя от дължината на пътя между преобразувателите, която обикновено е 10 до 20 см.

Ултразвуковите анемометри могат да правят измервания с много фина времева резолюция - 20 Hz или повече, което ги прави подходящи за измервания при турбуленция на въздушния поток, където те запазват оптималните си експлоатационни характеристики.

Липсата на движещи се части ги прави подходящи за дългосрочна употреба в открити автоматизирани метеорологични станции, метеорологични шамандури, корабна навигация, авиация и вятърни турбини, където точността и надеждността на традиционните анемометри с чаши и лопатки се влияят неблагоприятно от соления въздух или праха.

Недостатък е високата им цена, съчетана със сложни схемни решения, поради което се употребяват при отговорни измервания. Основен недостатък е също изкривяването на въздушния поток от конструкцията, поддържаща преобразувателите, което изисква корекции на резултатите, въз основа на измервания в аеродинамични тунели, за да се сведе до минимум ефекта.

Тъй като скоростта на звука варира в зависимост от температурата и е практически стабилна при промяна на налягането, ултразвуковите анемометри също се използват като термометри.

Двуизмерните (2D) акустични сензори за вятър са два вида:

- С две ултразвукови пътеки: Тези сензори имат четири рамена. Недостатъкът на този тип сензор е, че когато вятърът идва в посока на ултразвукова пътека, раменете нарушават въздушния поток, намалявайки точността на полученото измерване;
- С три ултразвукови пътеки: Тези сензори имат три рамена. Те дават излишък на измерване по един път, което подобрява точността на сензора и намалява аеродинамичната турбулентност.

Обект на настоящата работа е разработване на контролер за измерване на скоростта и посоката на вятъра с четирираменен ултразвуков анемометър, базиран на Arduino платформа и ултразвукови модули за измерване на разстояние.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Теоретични основи

Същността на метода за измерване на скоростта на вятъра е да се измерва транзитното забавяне на ултразвукови вълни (импулси) от предавателя до приемника, които са разположени на определено разстояние един от друг. При известно константно разстояние между сензорите е лесно да се изчисли скоростта на разпространение на сигнала. Тогава истинската скорост на вятъра ще бъде равна на разликата между референтната проектна скорост и измерената. Знакът ще покаже посоката на вятъра.

За сух въздух скоростта на разпространение на звука $c_{\text{dry air}}$ може да бъде пресметната чрез следната зависимост (1) [1]:

$$c_{\text{dry air}} \approx 331.4 + 0.6T_c \text{ [m/s]}, \quad (1)$$

където T_c е температурата на въздуха в °C. За опростяване на зависимост (1) в нея са игнорирани зависимостите на скоростта на звука от относителната влажност на въздуха, газовия състав на въздуха и атмосферното налягане. Най-значимо влияние върху скоростта на звука имат температурата на въздуха и газовият му състав, относителната влажност има около един порядък по-ниско влияние като при по-сух въздух скоростта е по-ниска, а влиянието на атмосферното налягане може да се пренебрегне (за обхвата на обитаемите надморски височини то е приблизително еднакво). Газовият състав на въздуха може също да се игнорира като фактор, ако съотношението на газовия микс се запази постоянно.

Изминатият път от ултразвуковите вълни може да се пресметне чрез (2), когато посоката му съвпада с тази на разпространение на ултразвуковите вълни във въздуха, тъй като скоростта им се сумира с тази на вятъра:

$$S = \text{Tof}(c + V), \quad (2)$$

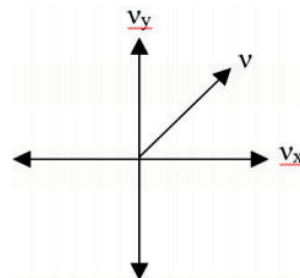
където S е разстоянието между предавателя и приемника, c е скоростта на звуковите вълни, Tof е времето на движение на ултразвуковата вълна от излъчвателя до приемника и V е скоростта на вятъра.

Тогава за пресмятане на скоростта на вятъра, може да се използва формула (3):

$$V = S / \text{Tof} - c \quad (3)$$

При известна температура на въздуха, c и S са известни, така че V зависи само от Tof .

Посоката на вятъра може да се представи като вектор V , ориентиран под определен ъгъл спрямо координатната система, в която са разположени рамената на анемометъра (фиг. 2).



Фиг. 2. Посока на вятъра в координатната система на 2D анемометъра

Анемометрите се ориентират спрямо основните световни посоки на компаса – например Изток по ос +X и Север по ос +Y.

Дължината на вектора в посоката на вятъра представлява неговата скорост V , която може да се пресметне като векторна сума от съставните му компоненти по осите X и Y – съответно V_x и V_y (4):

$$\vec{v} = \vec{v}_x + \vec{v}_y, \quad (4)$$

която се пресмята чрез (5):

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}. \quad (5)$$

Векторът може да попадне във всеки от квадрантите на координатната система, важно за изчисленията е да се отчита посоката на вятъра винаги с положителен знак, т.е. като число по-голямо от скоростта на звука c .

Например ако посоката на вятъра е към Юг (-Y), тогава ако се измерят скоростите на разпространение на ултразвуковите въл-

ни в посока от Север към Юг и обратно, ще се окаже, че първата е равна на $c+V_y$, а втората ще бъде равна на $c-V_y$.

Ъгълът на завъртане θ на векторът за посоката на вятъра може да се изчисли като се използва функция аркустангенс от отношението между компонентите на вектора на скоростта по осите Y и X (6):

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{v_y}{v_x}\right) \quad (6)$$

Полученият ъгъл на завъртане θ е между -180° и 180° . При добавяне към основните четири посоки на компаса също и междинните им посоки (общо осем посоки през 45°) и се приеме, че около всяка отчитана посока има толеранс от $\pm 22,5^\circ$, тогава се получават резултатите, представени в таблица 1.

Табл. 1. Връзка на изчисления ъгъл θ с посоката на вятъра при толеранс от $\pm 22,5^\circ$

Ъгъл	Посока
$-22,5 < \theta < 22,5$	Север
$22,5 < \theta < 67,5$	Североизток
$67,5 < \theta < 112,5$	Изток
$112,5 < \theta < 170$	Югоизток
$-180 < \theta < -157,5$ или $157,5 < \theta < 180$	Юг
$-170 < \theta < -112,5$	Югозапад
$-112,5 < \theta < -67,5$	Запад
$-67,5 < \theta < -22,5$	Северозапад

За да се пресметне скоростта на звука във въздуха c в израз (1) е нужно да е известна температурата на въздуха T_c . Тя може да се измери с помощта на допълнителен сензор в системата, но може също да се изчисли с помощта на същия израз, ако е известно Tof – времето за движение на ултразвуковата вълна от излъчвателя до приемника при известно разстояние между тях.

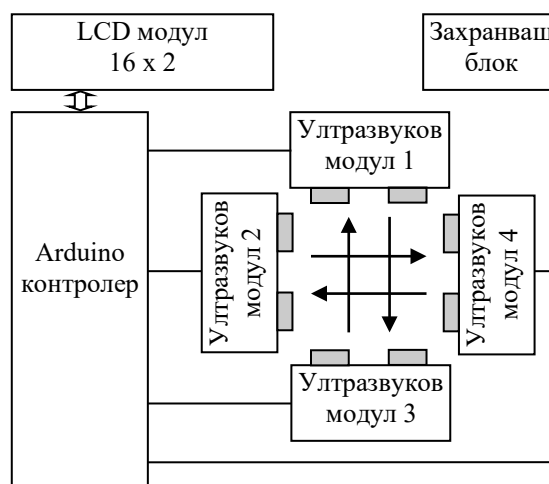
Без значение от текущите посока и скорост на вятъра, ако се сумират измерените стойности за време на движение по четирите основни посоки на анемометъра в един и същ момент от времето и се раздели на 4, ще се изчисли осреднената стойност за Tof_m , която е равна на скоростта на звука при нулева скорост на вятъра. Тази стойност се използва в израз (7), който се получава от заместването на израз (1) в (3) при

$V=0$, за изчисляването на текущата температура на въздуха T_c :

$$T_c = (S / Tof_m - 331.4) / 0.6 \quad (7)$$

Проектиране и хардуерна реализация

На фиг. 3 е представена функционална блокова схема на ултразвуковия анемометър.



Фиг. 3. Функционална блокова схема на 2D анемометъра

Измерването на Tof може да се извърши с готов модул за измерване на разстояние като HC-SR04 [2], който има достъпна цена и е лесен за използване.



Фиг. 4. Ултразвуков модул за измерване на разстояние HC-SR04

Сензорният модул HC-SR04 е базиран на ултразвукови пиезоелектрични сензори (излъчвател и приемник), работещи на 40kHz. Разполага с локален генератор и драйвер за подаване на възбудителни сигнали към излъчвателя, а също така има аналогов усилвател, свързан към приемника и детектор-интегратор на изхода му. За работа с модула е нужно да се подаде стартов импулс към него с продължителност от 10 μs , при което той генерира пакет от 8 на брой възбудителни импулси към излъчвателя в

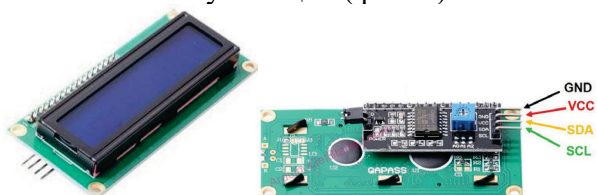
модула и се излъчват ултразвукови вълни, като в същия момент се стартира вътрешен таймер. При приемане на отразения пакет ултразвукови вълни от приемника в модула и преобразуването им в аналогов електрически сигнал, следва усилване, детектиране и натрупване като постоянно напрежение в интегратор. След достигане на зададен праг на напрежението в интегратора, вътрешния таймер спира и на изхода на модула се извежда правоъгълен импулс с определена продължителност (между 150 μ s и 25 ms; 38 ms ако не е получен входен сигнал), която е точно толкова време, колкото е било времето за полет на ултразвуковата вълна – времето от подаване на стартиращия импулс до получаването на отразената вълна (ехото), отчетено от вътрешния таймер в модула.

По принцип модула HC-SR04 е предназначен за измерване на разстоянието до отразяваща повърхност пред него – измереното време за полет е от модула до отразяващата повърхност и обратно (в двете посоки).

В конкретната разработка на анемометър сензорните модули са разположени по двойки един срещу друг, като разстоянието между тях е 20 cm. За измерването на *Tof* във всяка от четирите основни посоки ще се комбинират сигналите за изпращане и приемане на срещулежащите модули по следния начин:

- когато Модул 1 (Север) излъчва, тогава Модул 3 (Юг) ще приема;
- когато Модул 3 (Юг) излъчва, тогава Модул 1 (Север) ще приема;
- когато Модул 2 (Запад) излъчва, тогава Модул 4 (Изток) ще приема;
- когато Модул 4 (Изток) излъчва, тогава Модул 2 (Запад) ще приема.

За извеждане на измерванията от анемометър е избрано да се използва стандартен двуредов LCD модул с 16 символа на ред. За спестяване на необходимите изводи за управление от микроконтролера ще се използва специализиран модул за конвертиране към I2C комуникация (фиг. 5).



Фиг. 5. LCD 16x2 модул с I2C преобразувател

За реализацията на анемометър може да се избере всякакъв микроконтролер с достатъчно функционални възможности, но за улесняване на задачата е избрано да се работи с Arduino платформа, която има различни версии на хардуерно изпълнение, различни разширителни модули, развойна среда Arduino IDE с програмен език, подобен на C++ и богата поддръжка с готови библиотеки за работа с различни периферни устройства, сензори и интерфейси. Тази платформа има микроконтролер на Atmel от серията ATmega, поставен на платка с локално стабилизирано работно напрежение, изводите на микроконтролера са изведени на удобни конектори, има чип за програмиране и комуникация през USB интерфейс, както и други допълнителни възможности при някои версии.

За конкретната разработка на анемометър са нужни 8 цифрови извода (4 изхода и 4 входа) за подаване на стартови импулси към ултразвуковите модули HC-SR04 и съответно за приемане на импулсите за отчетено време на полет при приемане на вълни от модулите. Нужни са още 2 цифрови извода за реализиране на I2C комуникацията към LCD модула.

В блоковата схема на фиг. 3 е предвиден Захранващ блок, който трябва да осигурява необходимите напрежения за всички компоненти в анемометър. Захранването на устройството може да става от външен източник или от батерия с необходимото напрежение. Ултразвуковите модули, LCD модула с I2C преобразувател, както и Arduino платката работят на 5V. Удобство е наличието на стабилизатор на напрежение на +5V в повечето от Arduino платките, което е изведено на изводи и може да се използва за захранването на маломощни периферни модули.

За реализацията на анемометър е избрана платформата Arduino Uno, която разполага с 14 цифрови извода и 6 аналогови входа, като за I2C комуникацията ще се използват като втора функция аналоговите изводи A4 и A5 [2]. Неизползвани остават 6 цифрови извода и 4 аналогови входа, които могат да се използват за бъдещо развитие на проекта.

За захранването на останалите модули в системата ще се използва стабилизираното

изходно напрежение от +5V на Arduino Uno платката, а нейното захранване ще става от батерия с напрежение +9V с последователно свързан на нея прекъсвач. По този начин разработваният анемометър става автономно мобилно устройство с локален захранващ източник.

Програмно осигуряване

След включването на захранването на устройството се стартира програмното осигуряване на микроконтролера. В началото еднократно се извършва инициализация, при която се задават функциите на цифровите изводи и комуникационните изводи по I2C интерфейс, инициализира се LCD модула и се извеждат начални надписи към него, инициализира се също комуникацията по сериен интерфейс към USB за целите на диагностика, където също се изпраща начално съобщение. Всички променливи се установяват с начални стойности. Следва цикличното изпълнение на главната част от програмата до изключване на захранването.

В главната част на програмата се извършват последователно следните основни действия:

- Извършват се по 8 измервания за T_{of} чрез ултразвуковите модули за всяка от посоките, след което се изчисляват техните 4 осреднени стойности (за намаляване на грешките от измерване при турбуленции);

- Изчисляват се съставните части на векторите за всяка посока, температурата на въздуха T_c , скоростта на вятъра V и ъгълът на посоката му θ ;

- Получените текущи резултати се извеждат към LCD и към серийният интерфейс в подходящ форматиран вид.

На фиг. 6 е представен разработения анемометър при полеви тестове и показания на дисплея при липса на вятър.



Фиг. 6. Тестване на разработения анемометър

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При тестването на анемометъра с вятър от различни посоки се получават резултати, които са с толеранс около $\pm 10^\circ$ около основните оси, което може да се дължи на турбуленции от корпусите на ултразвуковите модули HC-SR04. При липса на вятър анемометърът понякога отчита грешни показания от около 0,02 м/с в случайна посока, което може да се приеме за допустимо в сравнение с измервателната грешка на други анемометри.

Разработката може да се използва за учебни цели и за база в други проекти.

Едно бъдещо развитие на проекта може да бъде насочено към добавяне на сензор за измерване на влажността на въздуха и извършването на изчисленията за скорост на разпространение на ултразвуковите вълни отчитайки нейното влияние. Може също да се промени конструкцията, с цел намаляване на влиянието на корпусите на ултразвуковите модули върху въздушния поток.

БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящата работа е финансово подпомогната от Проект № 2203Е за научни изследвания в Технически университет - Габрово.

REFERENCE

- [1] Nave, C. R., Sound Speed in Gases, (2014) <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/sound/souspe3.html#c1>, HyperPhysics, Georgia State University, 2014.
- [2] Cytron Technologies Sdn., User's Manual V1, HC-SR04 Ultrasonic Sensor, 2013.
- [3] Arduino.org, Arduino UNO R3, <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>, 2022.