

УДК 629.7.022

Є.О. Українець<sup>1</sup>, В.А. Безпалій<sup>1</sup>, І.В. Романенко<sup>2</sup>, К.В. Башинський<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

<sup>2</sup> В/ч А2215

<sup>3</sup> Державний науково-випробувальний центр України, Чернігів

## ЦИФРОВИЙ ПРИСТРІЙ ВИМІРУ ШВИДКОСТІ ПОТОКУ В РОБОЧІЙ ЧАСТИНІ АЕРОДИНАМІЧНОЇ ТРУБИ МАЛИХ ДОЗВУКОВИХ ШВИДКОСТЕЙ

*Розроблений пристрій виміру швидкості потоку в робочій частині аеродинамічної труби малих дозвукових швидкостей, що має переваги перед рідинними манометрами: меншою інерційністю, зручністю застосування, наочністю даних, що виводяться, можливістю виміру пульсацій швидкості потоку. Розроблений пристрій в перспективі може стати дублюючим пристроєм для існуючих мембранних приладів виміру швидкостей літальних апаратів або основною системою для малих безпілотних літальних апаратів.*

**Ключові слова:** аеродинамічна труба, експериментальні дослідження, швидкість потоку, термоанемометр, турбулентність, координатник, трубка Пито, тензодатчик.

### Вступ

Швидкість потоку в робочій частині аеродинамічних труб малих дозвукових швидкостей вимірюється, як правило, методом перепаду тиску у форкамері і робочій частині [1].

Для виміру статичного тиску по периметру форкамери встановлюється ряд приймачів статичного тиску, об'єднаних в один колектор для подачі тиску до чашки мікроманометра. Вимір температури і атмосферного тиску здійснюється стаціонарним чашковим ртутним барометром, найбільш точним стандартним приладом, скомбінованим з ртутним термометром.

Недоліком виміру швидкості потоку методом перепаду тиску у форкамері і робочій частині є неможливість виміру місцевих швидкостей за досліджуваною моделлю, тим більше, турбулентних пульсацій потоку.

Крім того висока гігроскопічність і випаровуваність спирту обумовлює необхідність його періодичної заміни на еталонний.

**Метою статті** є розробка пристрою виміру швидкості потоку в робочій частині аеродинамічної труби малих дозвукових швидкостей.

**Аналіз попередніх досліджень.** У роботах [2, 3] показано, що існуючі методики і устаткування аеродинамічних труб малих дозвукових швидкостей дозволяють достовірно визначати швидкість в робочій частині, рівень початкової турбулентності потоку, коефіцієнти поля в робочій частині. Зроблений висновок про те, що зараз немає можливості досліджувати місцеві турбулентні пульсації потоку, встановити рівень турбулентності по режимах роботи труби, що робить актуальною розробку методик виміру швидкості потоку з використанням термоанемометра.

У роботі [4] представлена експрес-методика виміру місцевої швидкості потоку в аеродинамічній трубі Т-1 Харківського університету Повітряних Сил, заснована на термоанемометричному методі, тобто на використанні властивості металевого провідника електричного струму змінювати свій опір при зміні температури.

Розроблена методика мала більшу наочність, чим визначення швидкості в ядрі потоку методом перепаду тиску у форкамері і робочій частині труби, проте значення опору датчика залежить від температури повітря в приміщенні лабораторії і, більшою мірою, від орієнтації датчика відносно вектору швидкості, що є істотним недоліком.

### Основна частина досліджень

Електричні датчики тиску – пристрої, призначені для перетворення в електричний сигнал деформації пружного чутливого елемента, що сприймає вимірюваний тиск. В цей час вони найчастіше використовуються як в техніці, так і в наукових дослідженнях [5]. Електричний вихідний сигнал забезпечує його реєстрацію за допомогою стандартних цифрових вольтметрів з безпосереднім введенням інформації в ЕОМ. Сучасні датчики тиску мініатюрні, забезпечують високу точність вимірів і є засобом, що дозволяє реєструвати нестационарні тиски в несталих потоках. Такі датчики незамінні при експериментальних дослідженнях в надзвукових і гіперзвукових аеродинамічних трубах короткочасної дії, де виміри іншими приладами виключені із-за великих запізнювань. При цьому дуже важливо, щоб власна частота пружного елемента таких датчиків у декілька разів перевищувала частоту вимірюваного тиску [5].

Залежно від вирішуваних завдань застосовують різні по конструкції і принципу дії електричні дат-

чки тиску. Найбільш широке поширення в аеродинамічних експериментах отримали датчики, принцип дії яких заснований на зміні омичного, індуктивного або ємнісного опору, викликаного деформацією пружного чутливого елемента.

Практично весь арсенал вимірювальних перетворювачів тисків, використовуваних в аеродинамічному експерименті, обмежується трьома типами: тензорезистивними, індуктивними і п'єзоелектричними.

Тензодатчики тиску є пружним елементом (мембраною), розташованим в герметичному корпусі, який сприймає вимірюваний тиск або перепад тиску. На пружний елемент наклеюються або напилюються дротяні, фольгові або напівпровідникові тензорезистори.

Зміна тиску в корпусі датчика викликає деформацію пружного елемента і, як наслідок, зміну електричного опору, який реєструється спеціальними приладами.

Принципова схема таких датчиків представлена на рис. 1.

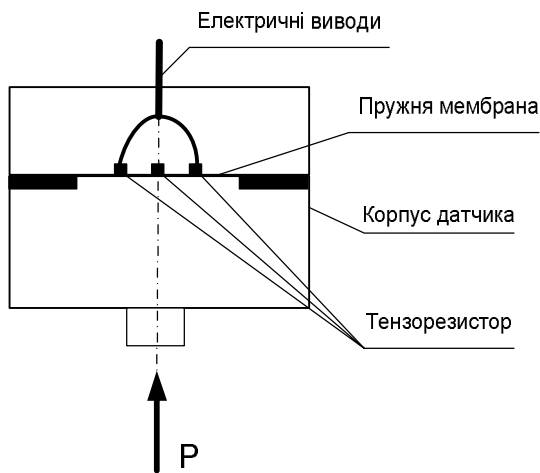


Рис. 1. Принципова схема тензодатчиків тиску

Подібні датчики тиску мають малі розміри (діаметр 2,5..8 мм), що дозволяє встановлювати їх урівень з поверхнею моделей. Зміна опору визначається спеціальними вимірювальними, як правило, мостовими схемами, що забезпечують компенсацію температурних погрешностей. Тензодатчики з заданим опором включаються в плечі вимірювального півмісту, розбалансування якого залежно від прогину мембрани відповідає вимірюваному тиску.

Зважаючи на переваги цифрових барометричних датчиків, було зібрано пристрій, здатний прочитувати інформацію з цифрового датчика, перетворювати дані і робити їх індикацію.

Структурна схема пристрою представлена на рис. 2, фотографія зовнішнього вигляду пристрою – на рис. 3.

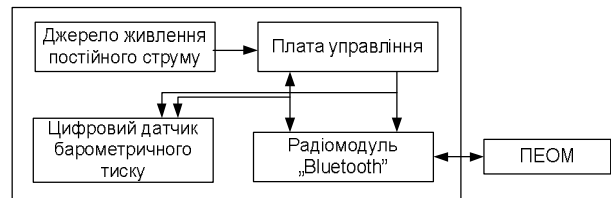


Рис. 2. Структурна схема пристрою

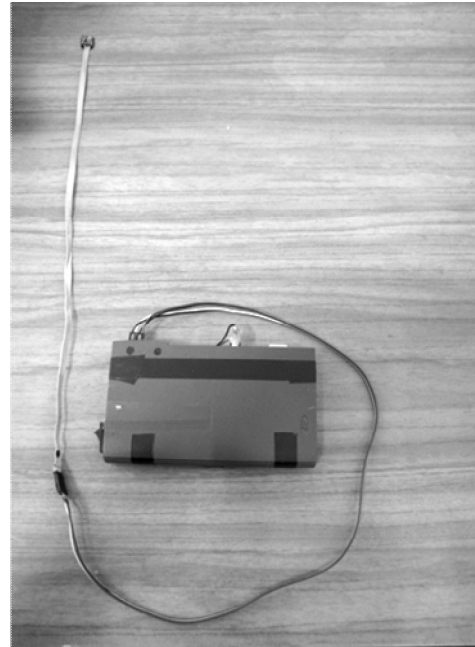


Рис. 3. Фотографія зовнішнього вигляду пристрою

Джерело живлення представлено у вигляді чотирьох батарей 1,5 В кожна, батареї сполучені послідовно. Джерело живлення використовується через плату управління, в якій напруга стабілізується до рівня 5 В, живить всі пристрої-споживачі: плату управління, датчик і радіо модуль. Плата управління представлена у вигляді платформи Arduino.

Arduino – це відкрита платформа, яка дозволяє збирати електронні пристрої. Пристрої можуть працювати як автономно, так і в зв'язці з комп'ютером або іншими пристроями або такими ж платформами, між собою. Платформа складається з апаратної і програмної частин.

Основні технічні характеристики платформи представлені в табл. 1 [6].

Arduino може жити як від USB підключення, так і від зовнішнього джерела, що і було застосовано в цьому пристрої. У представленому пристрої плата управління виконує такі функції як: стабілізація напруги живлення; управління датчиком і прийом даних від нього; обробку отриманих даних; передачу даних на радіо модуль. У пристрої застосований барометричний датчик тиску BMP180, який призначений для виміру барометричного, абсолютного, диференціального, надмірного тиску, а також значення температури повітря.

Таблиця 1  
Основні технічні  
характеристики платформи

Характеристики	Значення
Енергонезалежна пам'ять	32 Кб
Мікроконтроллер	АТmega328
ОЗП	2 Кб
Постійний струм для виводу 5 В	50 мА
Робоча напруга	5 В
Тактова частота	16 МГц
Кількість аналогових входів	6
Кількість цифрових входів/виходів	14
Габарити	6,9 × 5,3 см

Датчик виконано на окремій платі (рис. 4), управління датчиком здійснюється від плати управління.

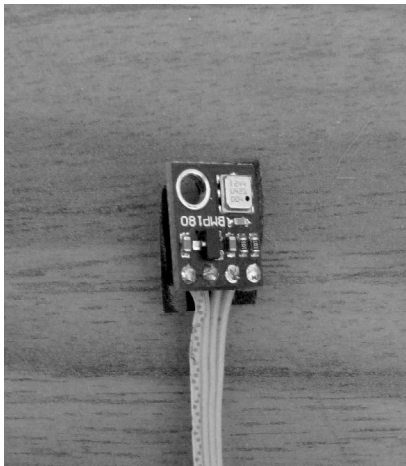


Рис. 4. Фотографія датчика (збільшено)

Чутливим елементом датчика є мембрана в корпусі, яка працює за п'єзореzистивним принципом. Технічні характеристики датчика представлені в табл. 2 [7].

Таблиця 2  
Технічні характеристики датчика

Характеристики:	Значення:
діапазон вимірюваного тиску	300 – 1100 гПа
напруга живлення	1,62 – 5В
споживання струму	0,0,5 мА
час спрацьовування	4,5 мс
точність виміру тиску	0,0,1гПа
точність виміру температури	0,0,1°С
робоча температура	-- 40 – 85°С
розміри	21 x 18 мм

Пристрій виконано за модульною схемою, що дає можливість подальшого використання елементів пристрою. Пристрій виконаний в одному корпусі, окрім датчика. Датчик встановлений на державці, через роз'єм і шину підключається до пристрою.

Наявність джерела постійного струму робить пристрій мобільним, а розміщення елементів в одному корпусі – компактним (рис. 3).

Дані з датчика, шістнадцятизначний код, поступають на плату управління, де відбувається перетворення даних в значення барометричного тиску, вимірюване в Паскалях.

Це значення поступає на радіомодуль "Bluetooth", який виконано на окремій платі, з якого можуть передаватися на будь-який пристрій з таким же модулем, наприклад, через спеціальну програму – на смартфон (рис. 5).

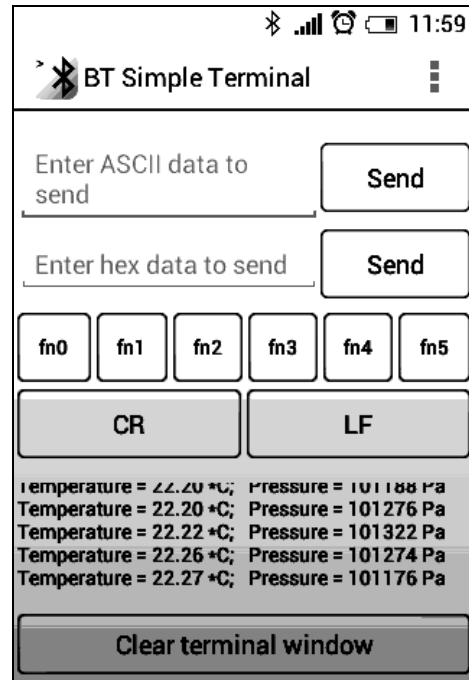


Рис. 5. Інтерфейс програми

На рис. 6 представлена отримана в результаті аеродинамічного експерименту залежність швидкості в робочій частині аеродинамічної труби від показань рідинного манометра.

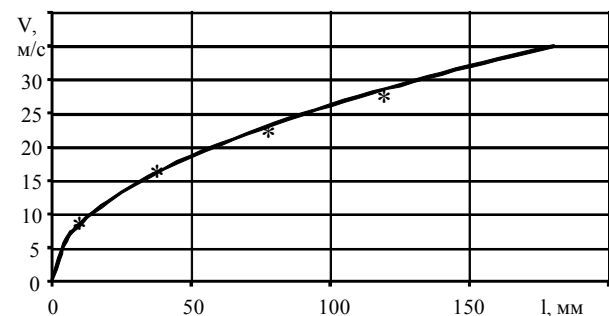


Рис. 6. Залежність швидкості в робочій частині аеродинамічної труби від показань рідинного манометра

На залежності маркерами позначені відповідні значення швидкості, отримані за допомогою розробленого пристрою.

Аналіз представленої залежності дозволяє зробити висновок про порівняну точність значень швидкості, які отримують методом перепаду тисків і за допомогою розробленої методики. При цьому розроблена методика має більшу наочність і зручність використання, можливість автоматичної підтримки швидкості потоку в робочій частині аеродинамічної труби.

Недоліком розробленої методики, виявленим в процесі аеродинамічного експерименту, є висока чутливість від орієнтації датчика відносно вектору швидкості.

## Висновки

1. Розроблений пристрій, завдяки використанню цифрового п'єзоелектричного датчика, має порівняну точність виміру і істотно більшу швидкодію, ніж штатний, рідинний манометр. Більша швидкодія дозволяє вимірювати пульсації швидкості потоку.

2. Розроблений пристрій є мобільним і компактним, з передачею даних на смартфон або персональний комп'ютер. Пристрій побудовано за модульним принципом, що дозволяє збільшувати кількість датчиків (вимірювати швидкість потоку в різних точках), додавати до схеми інші елементи або використовувати елементи пристрою для виконання інших завдань і експериментів.

3. Пристрій є цифровим, тому в перспективі може бути використано в навігаційних системах, побудованих на електронно-обчислювальних машинах, можливе впровадження пристрою на малорозмірних безпілотних літальних апаратах для заміни або дублювання мембранних приладів.

4. Недоліком розробленої методики є висока чутливість від орієнтації датчика відносно вектору швидкості потоку.

У подальшій роботі передбачається вдосконалення розробленої методики виміру швидкості потоку в робочій частині аеродинамічних труб, розширення спектру вирішуваних завдань аеродинамічного експерименту.

## Список літератури

1. Харитонов А.М. Техника и методы аэрофизического эксперимента: [учебн.] / А.М. Харитонов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – Ч. 1: Аэродинамические трубы и газодинамические установки. – 220 с.
2. Анипко О.Б. Аэродинамический облик, радиолокационная и инфракрасная заметность самолетов военного назначения при их обнаружении: [моногр.] / О.Б. Анипко, В.Г. Башинский, Е.А. Украинец. – Запорожье: «АО Моторсич», 2013. – 250 с.
3. Соляник П.Н. Экспериментальная аэродинамика: [учеб. пособ. по лаборатор. практикуму] / П.Н. Соляник, М.Л. Сургалю, В.В. Чмовж. – Х.: ХАИ, 2007. – 96 с.
4. Украинец Е.А. Экспресс-методика измерения местной скорости потока в аэродинамической трубе малых дозвуковых скоростей Т-1 / Е.А. Украинец, В.В. Василенко, И.В. Романенко, И.О. Коломиец // Системы озброєння і військова техніка. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 1(37). – С. 242-247.
5. Харитонов А.М. Техника и методы аэрофизического эксперимента: [учебн.] / А.М. Харитонов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – Ч. 2. Методы и средства аэрофизических измерений. – 456 с.
6. Платформа Arduino Uno. Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа к техническому описанию: <http://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardUno>.
7. BMP180 Data sheet, Document revision 2.5, Document release date 5 April 2013, Document number BST-BMP180-DS000-09, Technical reference code 0 273 300 244.

Надійшла до редколегії 22.02.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.А. Калкаманов, Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

## ЦИФРОВОЕ УСТРОЙСТВО ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ПОТОКА В РАБОЧЕЙ ЧАСТИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЫ МАЛЫХ ДОЗВУКОВЫХ СКОРОСТЕЙ

Е.А. Украинец, В.А. Беспалый, И.В. Романенко, К.В. Башинский

*Разработано устройство измерения скорости потока в рабочей части аэродинамической трубы малых дозвуковых скоростей, обладающее преимуществами перед жидкостными манометрами: меньшей инерционностью, удобством применения, наглядностью выводимых данных, возможностью измерения пульсаций скорости потока. Разработанное устройство в перспективе может стать дублирующим устройством для существующих мембранных приборов измерения скоростей летательных аппаратов или основной системой для малых беспилотных летательных аппаратов.*

**Ключевые слова:** аэродинамическая труба, экспериментальные исследования, скорость потока, термоанемометр, турбулентность, координатник, трубка Пито, тензодатчик.

## DIGITAL DEVICE MEASURING FLOW RATE IN THE WORKING OF SMALL WIND TUNNEL SUBSONIC SPEEDS

Е.О. Ukrainets, V.A. Bepaliy, I.V. Romanenko, K.V. Bashinsky

*Developed measurement device flow velocity in the test section of the wind tunnel low subsonic speeds, has the advantage over liquid manometers: less inertia, ease of application, clarity of output data, to measure the flow rate fluctuations. The developed device has the potential to become a duplicate anaerobic membrane device existing instruments measuring speed of the aircraft or the main system for small pilotless aircraft.*

**Keywords:** wind tunnel, experimental studies, flow rate, anemometer, turbulence, dial coordinates, tube of Pito, sensor of pressure.