

*В.М. КАРТАШОВ, д-р техн. наук, Г.І. СІДОРОВ, канд. техн. наук,  
С.Г. ТОЛСТИХ, канд. техн. наук, С.В. ШАПОВАЛОВ, канд. техн. наук*

## АКУСТИЧНИЙ ВИМІРЮВАЧ ШВИДКОСТІ ВІТРУ В АТМОСФЕРНОМУ ПРИКОРДОННОМУ ШАРІ

### Вступ

Описаний в роботі вимірювач відноситься до галузі прикладної метеорології і може бути використаний в ряді галузей народного господарства: в авіації для дистанційного вимірювання швидкості вітру над злітно-посадковою смугою, в зонах розташування металургійних та хімічних підприємств для прогнозування зон вітрового виносу шкідливих викидів, а також при обґрунтуванні місць розташування вітряків в системах вітроенергетики.

В даний час для вимірювання метеопараметрів атмосферного прикордонного шару здебільшого використовуються контактні датчики, які розміщені на різних рівнях висотних споруд в зонах аеропортів та метеостанцій [1]. Недоліком цього методу є те, що він не дозволяє вимірювати метеопараметри у 100-метровому атмосферному шарі безпосередньо над зонами розташування промислових підприємств, які є джерелом шкідливих викидів в атмосфері.

Швидкість вітру може бути виміряна системами дистанційного акустичного або радіоакустичного зондування [2 – 9]. В роботах [10, 11] описані результати досліджень вітрового режиму атмосферного прикордонного шару методами акустичного зондування.

Відомі способи дистанційного вимірювання швидкості вітру в атмосфері, які засновані на ефекті Доплера при розсіюванні акустичних коливань температурною і вітровою турбулентністю.

Нами запропонований і запатентований інший метод вимірювань, заснований на вимірюванні переміщень акустичного пакету під впливом вітру [12].

### 1. Розрахунок складових вектора швидкості вітру

Траекторія руху акустичного пакету під дією повітряних потоків [13] може бути описана як переміщення кінця радіус-вектора  $R(t)$ , який з'єднує точку випромінювання (початок координат) з поточним місцеположенням акустичного пакету (рис. 1).

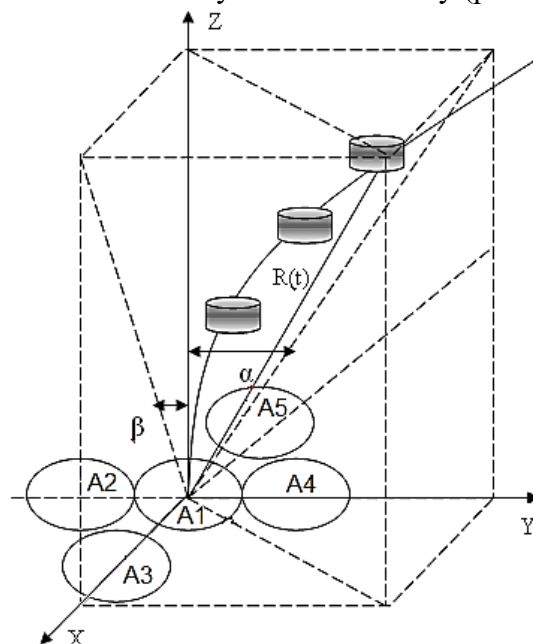


Рис. 1. Траекторія руху акустичного пакету під дією повітряних потоків

Як відомо [14], довжина радіус-вектора, який змінюється в часі, може бути подана у вигляді

$$R(t) = \sqrt{X^2(t) + Y^2(t) + Z^2(t)},$$

а його проекції на вісі координат

$$Z(t) = \frac{R(t)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha(t) + \operatorname{tg}^2 \beta(t)}}$$

$$X(t) = \frac{R(t) \cdot \operatorname{tg} \alpha(t)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha(t) + \operatorname{tg}^2 \beta(t)}}$$

$$Y(t) = \frac{R(t) \cdot \operatorname{tg} \beta(t)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha(t) + \operatorname{tg}^2 \beta(t)}}$$

де

$$\operatorname{tg} \alpha(t) = \frac{X(t)}{Z(t)}, \quad \operatorname{tg} \beta(t) = \frac{Y(t)}{Z(t)}.$$

Відбитий від температурних неоднорідностей атмосфери вздовж траси поширення акустичний сигнал приймається чотирма приймальними антенами, обробляється в блоках суми-різниці, в блоці суми підсилюється до необхідного рівня і нормується за допомогою блока АРП в блоках підсилення сигналу, в блоках вимірювання кутів приходу сигналів вимірюються кути приходу  $\alpha$  і  $\beta$  відбитого акустичного сигналу у взаємно-перпендикулярних площинах  $XOZ$  і  $YOZ$  відповідно.

Вважаючи, що на невеликих ділянках [12] на акустичні хвилі вплив вітру незначний, тобто, приймаючи частково-лінійне поширення, довжина вектора  $R(t)$  може бути обчислена в послідовні моменти часу за формулою  $R(t) = C_{зв} \cdot \Delta t \cdot \Delta t = 2t_3$ ,  $t_3$  – час затримки сигналу від моменту випромінювання. Коефіцієнт «2» враховує час поширення звуку від передавальної акустичної антени до об'єкта і в зворотному напрямку від об'єкта до приймальних акустичних антен. Потенційна похибка вимірювання довжини вектора  $R(t)$  в основному залежить від похибки в значенні  $C_{зв} = a\sqrt{T}$ , де  $T$  – температура в градусах Кельвіна,  $a$  – постійний коефіцієнт. Зміни температури в межах  $\pm 30^\circ$  від  $T = 273^\circ \text{C}$ , можуть привести до похибки  $\pm 3\%$ , але ця похибка майже не впливає на кінцевий результат. Поточні значення кутів  $\alpha(t)$  і  $\beta(t)$ , які характеризують кутове положення радіус-вектора  $R(t)$ , містяться в сигналах, які надходять на антени А1-А4.

Запишемо вирази для складових швидкості вітру:

$$V_x = \frac{C_{зв} \Delta t \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta}}, \quad V_y = \frac{C_{зв} \Delta t \cdot \operatorname{tg} \beta}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta}}, \quad V_z = \frac{C_{зв} \Delta t}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta}},$$

де  $V_x, V_y, V_z$  – складові швидкості вітру в відповідних площинах;  $\alpha - 2^\circ$ ;  $\beta - 2^\circ$  (типіві значення для помірної вітру).

## 2. Дослідження методичних похибок вимірювання

При проектуванні вимірювальних систем на першому етапі ескізного проекту важливо отримати прогностичні оцінки якості вимірювань. Для цього обчислюють значення сумарної середньоквадратичної похибки [15]. При вимірюванні швидкості вітру в заданому обсязі простору методом АЗ вважають, що швидкість і траєкторія руху акустичного пакета визначається температурою і швидкістю вітру. Є також флуктуації їх значень навколо середнього значення. Зазначені причини є джерелом методичних похибок. Крім того, практично в будь-якій вимірювальній системі існують похибки вимірювання швидкості об'єкта, зумовлені:

- флуктуаціями, які супроводжують сигнал;
- змінами вимірюваного параметра протягом часу спостереження;
- недосконалістю вимірювальної апаратури.

Перша причина обумовлює флуктуаційну помилку, мінімум якої обмежується власним шумом вимірювача, яка називається потенційною, друга – динамічною, третя – інструментальною.

З урахуванням сказаного ясно, що на першому етапі проектування системи АЗ необхідно проаналізувати джерела помилок вимірювань і це дозволить сформулювати вимоги до точнісних характеристик підсистем і блоків системи, а також провести оптимальний перерозподіл похибок в структурі системи (рис. 2).

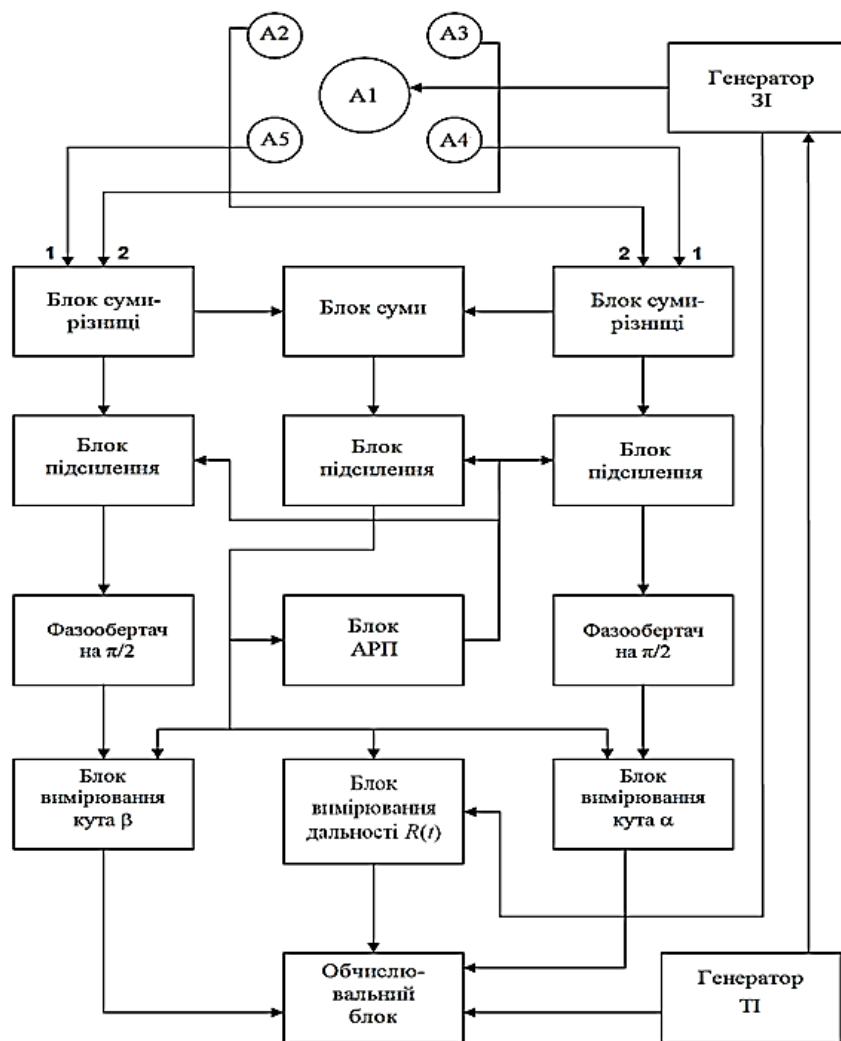


Рис. 2. Структурна схема акустичного вимірювача швидкості вітру в атмосферному прикордонному шарі

Типовими складовими інструментальної похибки вимірювань є: основна, додаткова і динамічна похибки вимірювань, а також похибка, обумовлена взаємодією з об'єктом вимірювань. Отже, розрахункова атестація метрологічних характеристик зводиться до визначення максимально можливого для заданих умов вимірювань інтервалу, в якому із заданою ймовірністю лежать практично досяжні значення похибки вимірювань.

Оскільки в більшості випадків безпосередньо вимірюється не та величина, яка цікавить дослідника, а будь-яка інша (або їх сукупність), що залежить від неї тим чи іншим чином, необхідно проводити аналіз помилок непрямих вимірювань.

Непрямими називають такі виміри, при яких вимірювана величина визначається на підставі результатів прямих вимірювань інших величин, пов'язаних з шуканою відомою залежністю.

При непрямих вимірах задача зводиться до відшукування оцінки дійсного значення  $Z_d$  деякої величини  $Z$ , що є функцією інших (однорідних або різнорідних) величин  $X, Y, \dots, T$ , значення яких  $x, y, \dots, t$  визначають за результатами прямих вимірювань. При цьому похибка оцінки  $Z$  залежить не тільки від похибок результатів вимірювань  $X, Y, \dots, T$ , але і від виду використовуваної функціональної залежності  $Z = F(X, Y, \dots, T)$ .

Якщо випадкові похибки вимірювань  $X, Y, \dots, T$  досить малі, то функція  $F(X, Y, \dots, T)$  може бути з достатньою точністю представлена лінійними членами її розкладання в ряд Тейлора.

Тоді оцінка  $Z$  дійсного значення  $Z_d$  величини  $Z$  визначається як

$$\bar{Z} = F(x_0, y_0, \dots, t_0),$$

де  $x_0, y_0, \dots, t_0$  відповідають  $\bar{x}, \bar{y}, \dots, \bar{t}$ .

Якщо вимірювана величина  $Z$  є функція багатьох змінних  $x$ :

$$Z = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n),$$

то середньоквадратична помилка може бути обчислена за формулою

$$\sigma_Z = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2};$$

Оцінку середнього квадратичного відхилення величини або точкову характеристику випадкової похибки визначення складових швидкості вітру  $V$  розраховують за формулою

$$\sigma_V = \sqrt{\left( \frac{\partial V}{\partial C_{3B}} \right)^2 \sigma^2 C_{3B} + \left( \frac{\partial V}{\partial \Delta t} \right)^2 \sigma^2 \Delta t + \left( \frac{\partial V}{\partial \alpha} \right)^2 \sigma^2 \alpha + \left( \frac{\partial V}{\partial \beta} \right)^2 \sigma^2 \beta},$$

де  $\left( \frac{\partial V}{\partial \alpha} \right)$  – значення приватних похідних функції  $V(C_{3B}, \Delta t, \alpha, \beta)$  за відповідними аргументами при їх середніх значеннях.

Загальне правило обчислення помилок для випадку непрямих вимірювань може бути легко отримано за допомогою методів диференціального обчислення (рис. 3).

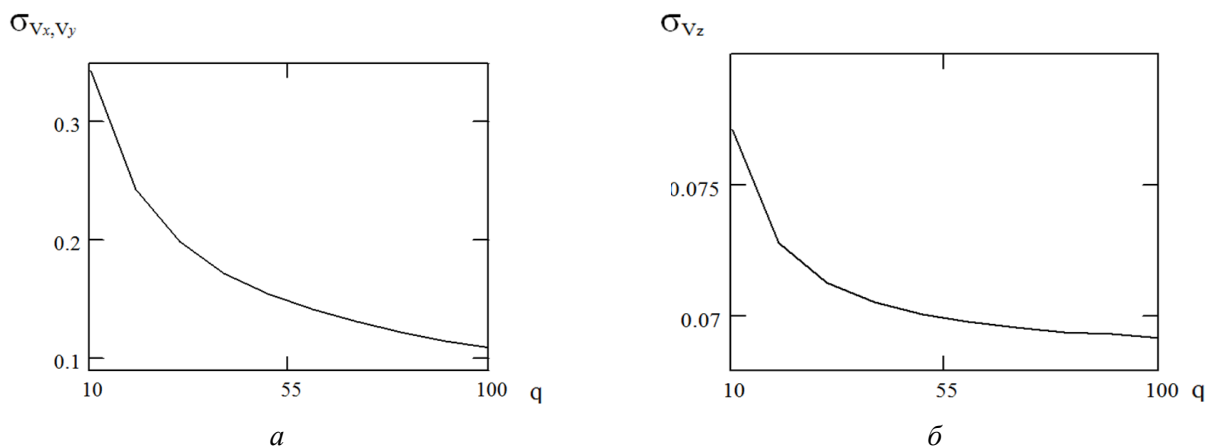


Рис. 3. Графіки залежності похибок вимірювання швидкості вітру від відношення сигнал/шум

## Висновки

У роботі наведено результати дослідження і розробки системи акустичного зондування для вимірювання параметрів вітрової обстановки в прикордонному атмосферному шарі.

Наведено структурну схему системи акустичного зондування атмосфери.

Проведено аналіз вітрової обстановки в прикордонному атмосферному шарі. Розраховано відносини сигнал/шум для різних висот. Розраховано місцеположення акустичного пакета щодо зміни довжини радіус-вектора.

Проаналізовано швидкість зносу акустичного пакета на різних висотах і залежність похибки вимірювань від співвідношення сигнал/шум.

Розраховано похибки по компонентам швидкості вітру в різних площинах, а також співвіднесені значення похибок при різних параметрах відносини сигнал/шум.

Обчислені дані повністю задовольняють вимогам, поставленим при дослідженні і розробці даної системи акустичного зондування атмосфери і вимірювання швидкості вітру в прикордонному шарі атмосфери методом акустичної локації.

### Список літератури:

1. Баранов А.М. Авиационная метеорология. Ленинград : Гидрометеиздат, 1981. 384 с.
2. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферы. Новосибирск : Наука, 1986. 170с;
3. Каллистратова М.А., Кон А.Н. Радиоакустическое зондирование атмосферы. Москва : Наука, 1985. 199с.
4. Beran D.W., Little C.G., Wilthmarth B.C. Acoustic Doppler measurements of vertical velocities in the atmosphere // Nature. 1979. 130.19. P.160-12.
5. An acoustic clopper sounder for measuring wind profiles in the lower boundary layer // Journal applied meteorology. 1977. №16. P.1298-1303.
6. Патент UA №73397, G01S13/95, кубі IS.07.2005. Бюл. №7.
7. Systematic errors in measurement of meteorological variables in correlation processing of signal of radio acoustic sounding systems / V.M. Kartashov, S.I. Babkin, Y.G. Tolstykh, N.G. Lepeha // Telecommunications and Radio Engineering. New York, 2016. Vol. 75(9). P. 835-843.
8. Methodical errors in meteorological measurements during correlation processing of signals from radio acoustic sounding systems / V.M. Kartashov, S.I. Babkin, Y.G. Tolstykh // Telecommunications and Radio Engineering. New York, 2017. Vol. 76(20). P.1861-1867.
9. Прошкин Е.Г., Карташов В.М., Бабкин С.И., Волох А.В. Современное состояние, проблемы и перспективы систем радиоакустического зондирования // Радиотехника. 2010. Вып. 150. С. 5-16
10. Mahoney A.R., McAllister L.G., Pollard J.R. The remote sensing of wind velocity in the lower troposphere using an acoustic sounder // Boundary Layer Meteorol. 1973. V.4. P.155-167.
11. Peters G.Wamser C., Hinzpeter h. Acoustic Doppler and angle of arrival wind detection and comparisons with direct measurements at a 300 m mast // J. Appl. Meteorol. 1978. V.17. P.1171-1178.
12. Патент США №3889533, кл. G01W1/06; G01S9/66, 1975.
13. Справочник по математике для научных работников «инженеров». Москва : Наука, 1984. 680с.
14. Патент UA на винахід №118817 від 11.03.2019 «Акустичний спосіб вимірювання швидкості вітру в атмосферному прикордонному шарі і пристрій для його здійснення».
15. Зайдель М.Н. Теория измерений. Москва : Наука, 1983. 186 с.

*Харківський національний  
університет радіоелектроніки*

*Надійшла до редколегії 08.11.2019*