

## SYSTEM POMIAROWY DO BADANIA STRUMIENI MASY I ENERGII METODĄ KOWARIANCJI WIRÓW

*J. Leśny<sup>1</sup>, J. Olejnik<sup>1</sup>, B.H. Chojnicki<sup>1</sup>, F. Eulenstein<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Katedra Agrometeorologii AR, 60-667 Poznań, ul. Witosza 45, jlesny@owl.au.poznan.pl.

<sup>2</sup>Centre for Agricultural Landscapes and Land Use Research, Müncheberg, Germany

**S t r e s z c z e n i e.** W artykule przedstawiono teoretyczne podstawy pomiarów strumieni masy i energii metodą kowariancji wirów. Przedyskutowano kilka faktów związanych z metodologią prowadzenia badań bioklimatycznych. Szczególną uwagę zwrócono na najnowsze techniki pomiarów strumieni energii i masy wymienianych powierzchnią czynną a atmosferą. Przedstawiono szczegóły funkcjonowania analizatora gazowego o otwartej ścieżce optycznej oraz anemometru akustycznego. Opisano zasadę działania systemu mierzącego metodą kowariancji wirów.

**S ł o w a k l u c z o w e:** otwarty analizator gazowy, anemometr akustyczny, metoda kowariancji wirów.

### WSTĘP

W ostatniej dekadzie, rozwój technologii i teorii w mikrometeorologii stworzyły możliwość intensywnych badań interakcji pomiędzy atmosferą a podłożem. Stało się to głównie przez rozwój metody kowariancji wirów (eddy covariance, ang.), która po raz pierwszy umożliwia bezpośrednie pomiary strumieni masy (np. dwutlenku węgla i pary wodnej) i energii wymienianej między powierzchnią czynną, a atmosferą na poziomie ekosystemu. Dzięki tym badaniom, możliwym staje się określenie sezonowej dynamiki tych procesów w kontekście sezonowych zmian fenologicznych, dostępnej energii czy wreszcie produkcji biomasy [1,4,6].

Badania prowadzone metodą kowariancji wirów wymagają zastosowania czujników pomiarowych i systemu zbierania danych o wyjątkowych, pod względem technicznym, parametrach. Podstawę systemu stanowią anemometr akustyczny oraz spektrometryczny analizator gazowy do badania stężeń dwutlenku węgla i pary wodnej w atmosferze. Katedra Agrometeorologii AR w Poznaniu jest w

posiadaniu anemometru akustycznego typu R3 angielskiej firmy Gill oraz najnowszego (dostępnego na rynku zaledwie od kilkunastu miesięcy) analizatora gazowego amerykańskiej firmy LICOR typu LI7500. Wraz z dataloggerem firmy Kest czujniki te stanowią bazę sprzętową do stworzenia całego systemu pomiarowego do badania strumienia masy i energii wymienianych między podłożem a atmosferą, metodą kowariancji wirów.

#### METODY BADAWCZE

Metoda kowariancji wirów jest jedyną znaną metodą pozwalającą dokonać pomiaru tych wielkości bez współczynników empirycznych. Podstawę teoretyczną do wyprowadzenia wzorów stosowanych w pomiarach stanowi równanie opisujące strumień dowolnej wielkości skalarnej [2,5]:

$$F_c = \overline{\varpi \cdot \rho_c} \quad (1)$$

gdzie:  $F_c$  jest średnią gęstością strumienia wielkości skalarnej w ustalonym czasie pomiarowym,  $\varpi$  jest chwilową składową pionową prędkości wiatru, a  $\rho_c$  jest chwilową gęstością (lub stężeniem) transportowanej substancji.

Po przeprowadzeniu tak zwanej dekompozycji Reynoldsa, uwzględniającej fakt, że chwilowa wartość wielkości fluktujującej w czasie jest równa sumie jej wartości średniej i chwilowego odchylenia, w ruchu turbulencyjnym powietrza chwilową wartość pionowej składowej prędkości wiatru oraz gęstości (lub stężenia) transportowanej substancji można zapisać w następujący sposób:

$$\varpi = \overline{\varpi} + \varpi' \quad (2)$$

$$\rho_c = \overline{\rho_c} + \rho_c' \quad (3)$$

gdzie  $\varpi'$  i  $\rho_c'$  to chwilowe odchylenia od średnich  $\overline{\varpi}$  i  $\overline{\rho_c}$ .

Zapisując teraz równanie (1) z użyciem procedury dekompozycyjnej otrzymuje się następującą postać równania:

$$\begin{aligned} F_c &= \overline{(\overline{\varpi} + \varpi') \cdot (\overline{\rho_c} + \rho_c')} = \\ &= \overline{\overline{\varpi} \cdot \overline{\rho_c} + \overline{\varpi} \cdot \rho_c' + \varpi' \cdot \overline{\rho_c} + \varpi' \cdot \rho_c'} \end{aligned} \quad (4)$$

które w wyniku własności operatora  $\bar{\phantom{x}}$  (wartość średnia) przyjmuje ostatecznie następującą postać:

$$F_c = \overline{\varpi} \cdot \overline{\rho_c} + \overline{\varpi'} \cdot \overline{\rho_c'} + \overline{\varpi' \cdot \rho_c} + \overline{\varpi' \cdot \rho_c'} \quad (4a)$$

Ponieważ w odpowiednio długim okresie czasu (w praktyce nawet do 30 minut) suma pionowych składowych prędkości wiatru w ruchu turbulencyjnym równa się zeru (tzn.  $\overline{\varpi} = 0$ , powietrze raz się unosi raz opada), ponadto z definicji (równanie 2 i 3) oraz, ostatecznie równanie (4) można zapisać:

$$F_c = \overline{\varpi' \cdot \rho_c'} \quad (5)$$

Równanie to matematycznie oznacza wartość kowariancji dwóch wielkości, jednak w zastosowaniu do pionowego przenoszenia materii lub energii w ruchu turbulencyjnym atmosfery służy także do praktycznego wyznaczenia strumienia przenoszonej wielkości.

Równanie (5) stanowi teoretyczną podstawę pomiarów turbulencyjnych strumieni masy i energii wymienianych między podłożem, a atmosferą. Jak widać jest to jedyna znana metoda pozwalająca dokonać pomiaru tych wielkości bez współczynników empirycznych [3].

Elegancja i prostota teorii metody kowariancji wirów niestety nie idzie w parze z łatwością prowadzenia pomiarów. Czujniki stosowane w tej metodzie muszą charakteryzować się bardzo małą stałą czasową oraz możliwością zbierania danych z dużą szybkością, minimum 10 pomiarów na sekundę.

#### STOSOWANE PRZYRZĄDY POMIAROWE

W metodzie kowariancji wirów konieczne jest stosowanie co najmniej dwóch bardzo zaawansowanych technologicznie czujników:

- anemometru akustycznego, pozwalającego na pomiar pionowej składowej ruchu powietrza oraz jej fluktuacji;
- spektrometrycznego analizatora gazowego do badania fluktuacji stężeń dwutlenku węgla i pary wodnej.

Oba te czujniki są bardzo zaawansowane technologicznie, ich dokładność jest bardzo wysoka (w przypadku prędkości wiatru  $0,01 \text{ m s}^{-1}$ , a w przypadku pomiaru stężeń  $1 \text{ ppm}$ ), a ich bezwładność jest praktycznie do pominięcia (w przypadku anemometru

akustycznego nośnikiem informacji jest fala akustyczna (ultradźwiękowa), a w przypadku analizatora gazowego nośnikiem informacji jest fala elektromagnetyczna).

W przypadku badania fluktuacji stężeń można stosować dwa typy analizatorów gazowych: starszego typu z zamkniętym torem optycznym (closed-path analyzer, ang.) [3] lub dostępnym od niedawna na rynku naukowym, z otwartym torem optycznym (open-path analyzer ang.).

Stosowanie analizatorów typu "open-path" w porównaniu z czujnikami typu "closed-path" znakomicie upraszcza cały system adaptacji czujnika do pomiarów w terenie, ale wymaga stosowania dodatkowego czujnika w postaci bezwładnej (bardzo cienkiej) termopary, aby możliwe stało się korygowanie stężeń analizowanego gazu w funkcji temperatury w czasie rzeczywistym. Szybkość próbkowania pomiarów temperatury musi być taka sama jak stężenia, co wymaga stosowania dodatkowego, bardzo dokładnego i szybkiego (40 Hz) urządzenia do pomiaru i akwizycji danych.

Niezależnie od wyboru typu czujnika spektrometrycznego do badania stężeń analizowanych gazów, aby obliczyć wartości strumieni energii lub masy wymienianych między podłożem, a atmosferą, w metodzie kowariancyjnej konieczne jest stosowanie czujnika do pomiaru składowej pionowej prędkości wiatru. Jednym z dostępnych na rynku czujników do tego typu pomiarów jest anemometr akustyczny R3 firmy Gill Instruments. W anemometrach akustycznych do pomiaru szybkości ruchu powietrza zakłada się, że dźwięk rozchodzi się w powietrzu ze stałą prędkością. Po emisji impulsu ultradźwiękowego z dolnego emitera, przyrząd mierzy czas po jakim dotrze on do górnego detektora. Jeśli powietrze unosi się to czas ten będzie krótszy niż w powietrzu nieruchomym, a jeśli powietrze opada to czas ten będzie dłuższy niż w powietrzu nieruchomym. Z porównania tych czasów czujnik określa kierunek (górze czy dół) przepływu porcji powietrza oraz jego prędkość. Czujnik R3 wyposażony jest w 3 pary nadajników-odbiorników, dzięki którym możliwe staje się mierzenie ruchów porcji powietrza w 3 kierunkach (X, Y, Z).

Ponieważ założenie stałej prędkości dźwięku w powietrzu nie jest do końca prawdziwe, konieczne jest stosowanie korekty. W urządzeniu Gill Instruments R3 każdy nadajnik jest jednocześnie odbiornikiem i wspomniany sygnał akustyczny wysyłany jest łącznie sześciokrotnie, w obie strony dla każdej z trzech par nadajników-odbiorników. W rezultacie możliwe jest precyzyjne (bez błędu wynikającego ze wspomnianego założenia) wyznaczenie prędkości wiatru w każdym z trzech kierunków. Możliwe jest również wyznaczenie fluktuacji temperatury powietrza i w

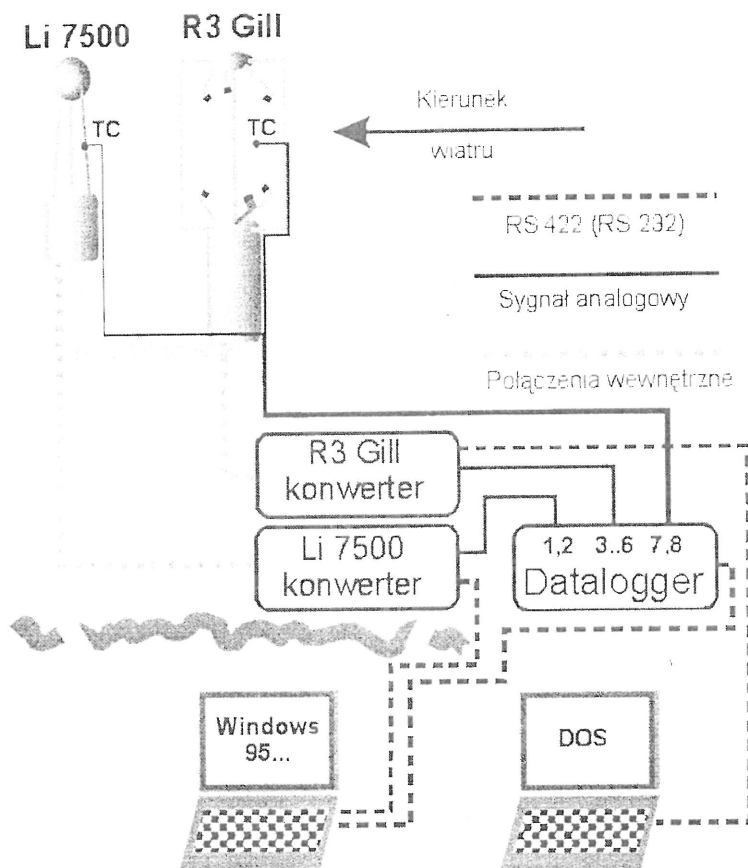
efekcie znalezienie gęstości strumienia ciepła jawnego przenoszonego z powierzchni czynnej do atmosfery [3].

#### SYSTEM DO POMIARU GĘSTOŚCI PIONOWYCH STRUMIENI METODĄ KOWARIANCJI WIRÓW

Przedstawione powyżej czujniki mogą pracować przesyłając dane przy pomocy łącz szeregowych bezpośrednio do komputerów typu PC. Jednak dołączane przez producentów oprogramowanie wyklucza równoległą współpracę analizatora gazowego i anemometru z jednym komputerem. Pomiary prowadzone równoległe przez dwa komputery uniemożliwiają sprostaniu konieczności ich jednoczesnego wykonywania. Zegary, w które standardowo wyposażane są komputery oraz ich oprogramowanie czynią niemożliwym wykonywanie koherentnych pomiarów stężenia CO<sub>2</sub> i pary wodnej oraz prędkości wiatru. Problematyczne jest także uwzględnienie koniecznych przesunięć w czasie w trakcie numerycznej obróbki zebranych wielkości. Utrudnieniem jest duża częstotliwość wykonywania pomiarów, od 10 do 50 razy w ciągu sekundy, automatyczne obliczenia na zbiorach danych o różnym czasie pomiaru mogłyby prowadzić do istotnych błędów w ocenie przenoszonych wielkości. Aby uniknąć opisanych problemów zastosowano centralny sterownik, którego zadaniem jest równoległe zbieranie danych zarówno z analizatora gazowego jak i anemometru. Dodatkową zaletą takiego rozwiązania jest możliwość zastosowania mikroskopijnych termopar do jednoczesnego pomiaru temperatury powietrza. Zadaniem sterownika jest także przetrzymywanie w pamięci zebranych wielkości i przesyłanie ich do komputera wykonującego obliczenia i archiwizującego dane. Zaletą tak skonfigurowanego systemu jest możliwość pracy w czasie rzeczywistym, co pozwala na bieżącą kontrolę wyników przez operatora. Schemat systemu pomiarowego przedstawiono na rys. 1.

#### PODSUMOWANIE

Przedstawiona teoria prowadzi do praktycznego opisu sposobu wykonywania badań strumieni masy i energii wymienianych między podłożem a atmosferą metodą kowariancji wirów. Badania te są możliwe dzięki powstałym w ostatnich latach wysoce zaawansowanym technicznie: analizatorowi gazowemu o otwartej ścieżce pomiarowej oraz anemometrowi akustycznemu. Rozwój elektroniki umożliwia tworzenie bardzo szybkich i pojemnych urządzeń sterujących pomiarami i magazynujących ich wyniki. Połączenie przedstawionych czujników



**Rys. 1.** System pomiarowy do badania strumieni energii i masy metodą kowariancji wirów (TC - termopara).  
**Fig. 1.** Eddy covariance method measurement system.

przy pomocy centralnego sterownika pozwala na stworzenie całego systemu do badania strumieni masy i energii. W artykule omówiono szczegóły konstrukcyjne jak również system akwizycji danych zbieranych podczas pracy całego systemu.

#### PIŚMIENNICTWO

1. **Anthoni P.M., Law B.E., Unsworth M.H.:** Carbon and water exchange of an open-canopied panderosa pine ecosystem. *J. Hydrology*, 95, 151-168, 1999.
2. **Arya S.P.:** Introduction to Micrometeorology. Acad. Press Inc., San Diego, 144, 1988.
3. **Olejnik J., Eulenstein F., Chojnicki B. H., Leśny J.:** Czujniki pomiarowe stosowane w badaniach strumieni masy i energii metodą kowariancji wirów. *Przeg. Nauk. Wydz. Mel. i Inż. Środ.*, SGGW, Warszawa, 21, 203-211, 2001.

4. **Cienciala E., Running S.W., Lindroth A., Grelle A., Ryan M.G.:** Analysis of carbon and water fluxes from the NOPEX boreal forest: comparison of measurements with FOREST-BGC simulations. *J. Hydrology*, 212-213, 62-78, 1998.
5. **Swinbank W.C.:** The measurement of vertical transfer of heat and water vapour by eddies in the lower atmosphere. *J. Meteorol.*, 8, 135-145, 1951.
6. **Valentini R., Baldocchi D.D., Tenhunen J.D.:** Ecological control on land-surface atmospheric interaction. In *Integrating Hydrology, Ecosystems Dynamics, and Biogeochemistry in Complex Landscape*, edited by J.D. Tenhunen and P. Kabat, John Wiley & Sons Ltd., 2000.

#### MEASUREMENT SYSTEM APPLIED TO HEAT AND MASS FLUXES MEASUREMENTS USING EDDY COVARIANCE TECHNIQUE

*J. Leśny<sup>1</sup>, J. Olejnik<sup>1</sup>, B.H. Chojnicki<sup>1</sup>, F. Eulenstein<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Department of Agrometeorology AU, 60-667 Poznań, Witosza 45, jlesny@owl.au.poznan.pl.

<sup>2</sup>Centre for Agricultural Landscapes and Land Use Research, Müncheberg, Germany

**S u m m a r y.** In this paper the principles of the theoretical background and technical methodology of eddy-covariance method were described. Some details about aims and methodology connected with bioclimatological investigations were discussed. Special attention was paid to modern measuring techniques of mass and energy exchange between active surfaces and the atmosphere. The principles of operation of closed-path and open-path gas analyzers as well as the sonic anemometer were presented. The measurement system used for eddy covariance method was described.

**K e y w o r d s:** open-path gas analyzer, sonic anemometer, eddy covariance method.