

DOI: 10.5604/01.3001.0009.5187

## SYSTEM DO POMIARÓW OBCIĄŻENIA WIATREM RUSZTOWAŃ ELEWACYJNYCH

**Andrzej Sumorek**

Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Mechaniki Budowli

**Streszczenie.** W pomiarach środowiskowych dużą grupę stanowią pomiary parametrów powietrza atmosferycznego. Są to najczęściej pomiary ukierunkowane na podstawowe parametry gazów takie jak temperatura, ciśnienie, wilgotność, skład, zanieczyszczenia. Najtrudniejszą grupą pomiarów są precyzyjne pomiary parametrów dynamicznych związanych z ruchem powietrza. W tekście przedstawiono samodzielnie zaprojektowany system do wielopunktowego pomiaru prędkości i ciśnienia powietrza. Przykładowe wyniki działania systemu pomiarowego zamieszczono w końcowej części artykułu.

**Słowa kluczowe:** akwizycja danych, pomiar strumienia płynu

### THE MEASUREMENT SYSTEM OF WIND LOAD OF FACADE SCAFFOLDING

**Abstract.** A large group of measurements among environmental measurements are measurements of atmospheric parameters. The most common measurements are focused on the basic parameters of gases such as temperature, pressure, humidity, composition, pollution. The most difficult group of measurements is accurate measurements of the dynamic parameters associated with the movement of air. The text presents the self-designed system for multi-point measurement of velocity and air pressure. Examples of the results of the measurement system are given in the final part of the article.

**Keywords:** data acquisition, fluid flow measurement

### Wstęp

Jednym z podstawowych dokumentów pozwalających na wyznaczanie obciążenia wiatrem budynków i budowli oraz ich części jest norma „PN-EN 1991-1-4:2008: Eurokod 1. Oddziaływanie na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływanie wiatru”. Norma określa zakres jej stosowania (np. do budynków i budowli o wysokości do 200 m) i wyklucza wybrane konstrukcje takie jak np. maszty i kominy z odciągami [26]. Oddziaływanie wiatru rozpatrywane jest jako „ciśnienie wywierane na zewnętrzne powierzchni budowli zamkniętych” oraz „ciśnienie wywierane na powierzchni wewnętrzne”. Podstawę do szacowania obciążenia wiatrem jest prawo Bernoulliego, które w normie przedstawiane jest w poniższej formie [10, 26]:

$$q_d = \frac{1}{2} \rho v_b^2 \quad (1)$$

gdzie:  $q_d$  – ciśnienie dynamiczne (wartość bazowa ciśnienia prędkości) [Pa],  $\rho$  – gęstość powietrza (wartość zalecana wg [26] 1,25) [kg·m<sup>-3</sup>],  $v_b$  – prędkość bazowa strumienia powietrza [m·s<sup>-1</sup>].

Kluczową wielkością przy wyznaczaniu obciążenia wiatrem jest wartość szczytowa ciśnienia prędkości  $q_p$ . Na podstawie szczytowej wartości ciśnienia prędkości  $q_p$  wyznacza się ciśnienie wiatru działające na zewnętrzną  $w_e$  i wewnętrzną  $w_i$  powierzchnię konstrukcji oraz siłę wywieraną przez wiatr na konstrukcję lub element konstrukcyjny  $F_w$  [26].

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \rho v_m^2 = c_e(z) q_b \quad (2)$$

gdzie:  $q_p$  – szczytowe ciśnienie prędkości na wysokości  $z$  [Pa],  $I_v$  – intensywność turbulencji [-],  $\rho$  – gęstość powietrza [kg·m<sup>-3</sup>],  $v_m$  – prędkość szczytowa strumienia powietrza [m·s<sup>-1</sup>],  $c_e$  – współczynnik ekspozycji [-],  $q_d$  – wartość bazowa ciśnienia prędkości [Pa].

W celu wyznaczenia newralgicznej wielkości szczytowego ciśnienia prędkości  $q_p$ , konieczne jest uwzględnienie [26]:

- bazowej prędkości wiatru  $v_b$ ,
- wysokości odniesienia  $z_e$ ,
- kategorii terenu,
- wartości charakterystycznej ciśnienia szczytowego,
- intensywności turbulencji  $I_v$ ,
- średniej prędkości wiatru  $v_m$ ,
- współczynnika rzeźby terenu  $c_0$ ,
- współczynnika chropowatości  $c_s$ .

Wartości wymienionych wyżej współczynników są obliczane, szacowane na podstawie wykresów lub przyjmowane na podstawie charakteru terenu lub konstrukcji. Przykładem może być tabelaryczne deklarowanie wartości bazowej prędkości wiatru

$v_b$  i bazowego ciśnienia prędkości  $q_b$  stanowiących podstawę przy szacowaniu obciążenia wiatrem (rys. 1, tab. 1).



Rys. 1. Normatywne strefy obciążenia Polski wiatrem

Tabela 1. Wartości podstawowe bazowej prędkości wiatru i ciśnienia prędkości wiatru w strefach dla wysokości  $A$  wyższej niż 300 m nad poziomem morza [26]

Strefa	$v_b$ [m·s <sup>-1</sup> ]	$q_b$ [kN·m <sup>-2</sup> ]
1	$22 \cdot [1 + 0,0006(A-300)]$	$0,30 \cdot [1 + 0,0006(A-300)]^2$
2	26	0,42
3	$22 \cdot [1 + 0,0006(A-300)]$	$0,30 \cdot [1 + 0,0006(A-300)]^2 \cdot [(2000-A)/(2000+A)]$

Otrzymany wynik obciążenia wiatrem wynika z obliczonych lub oszacowanych przez projektanta wartości współczynników. Zastosowanie niedoszacowanych lub przeschacowanych wartości skutkować będzie zadeklarowaniem obciążenia wiatrem różnym od rzeczywistego. Na to jak bardzo podejście do szacowania wpływa na otrzymane wyniki zwracano uwagę już wcześniej. Zastosowanie w stosunku do budynków podejścia wg nowej normy z dopuszczalnymi profilami ciśnienia prędkości potęgowym i logarytmicznym oraz wg dotychczas stosowanej normy wykazało, że stosując nowe zasady otrzymuje się większe wartości obciążenia wiatrem o 15%. Jednocześnie zwrócono uwagę na podniesienie trudności obliczeniowej [25]. Zastosowanie w odniesieniu do rusztowań metalowych normy PN-B-02011:1997 oraz dodatku Az1:2009 do PN-EN 1991-1-4 może skutkować rozbieżnością rzędu 80% [7]. Ten sam Autor zwraca uwagę na konieczność istnienia możliwości weryfikacji oprogramowania komputerowego do obliczania wytrzymałości za pomocą metod tradycyjnych [7]. W przypadku rusztowań pojawia się nawet twierdzenie o niezgodności wymagań normatywnych w odniesieniu do „Tymczasowych konstrukcji stosowanych na placu budowy” oraz „Rusztowań elewacyjnych z elementów prefabrykowanych” w zakresie z obecnym stanem wiedzy [10].

W pełni teoretyczne modele obciążenia wiatrem budowane na bazie norm powinny być weryfikowane innymi metodami. Istnieją trzy metody takiej weryfikacji.

Pierwsza z metod weryfikacji polega na przeprowadzeniu symulacji numerycznej. Obciążenie wiatrem można symulować za pomocą wybranego modelu komputerowej mechaniki płynów CFD (computational fluid mechanics). Ponieważ Direct Numerical Simulation (DNS) wymaga znacznych zasobów obliczeniowych (mocy obliczeniowej, pamięci i czasu) korzysta się z modeli przyśpieszających obliczenia: Reynolds Averaged Navier–Stokes (RANS, wykorzystanie równania Naviera–Stokesa do ograniczenia zakresu strumienia, ograniczenie ujęto przez tensor naprężenia Reynoldsa), Large-Eddy Simulation (LES, usunięcie małych wirów przez filtrowanie), Discrete Vortex Method [3, 4, 8, 9, 13, 14].

Dругa z metod weryfikacji polega na sporządzeniu modelu i badaniu w tunelu, w którym możliwe jest wymuszenie kontrolowanego przepływu strumienia powietrza tj. w tunelu aerodynamicznym [21, 22, 23]. W związku ze stacjonarnym stosowaniem aparatury kontrolno-pomiarowej w tunelu możliwe jest wykonywanie wielopunktowego pomiaru za pomocą wielokanałowych skanerów ciśnienia. Niekiedy badania modelowe w tunelu aerodynamicznym weryfikowane są na fizycznie istniejącym obiekcie [1].

Praktyczną weryfikacją projektów opartych na normach, modelowanych numerycznie, testowanych w tunelach aerodynamicznych są badania rzeczywistych obiektów, badania in-situ. Jednymi z pierwszych publikacji zawierających wyniki badań obiektów rzeczywistych są publikacje pochodzące z lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku. W latach 1974–1980 57-piętrowy budynek Commerce Court West w Toronto poddawany był jednoczesnym badaniom in-situ oraz testom modelu w tunelu aerodynamicznym [5, 6]. Ostatnie lata rozwinęły badania na obiektach rzeczywistych. Często spotykanym przykładem w pełni opomiarowanego obiektu jest obiekt „Silsoe cube” (rys. 2). Dane zebrane dzięki „Silsoe cube” konfrontowane są z wyniki symulacyjnymi i modelowanymi w tunelach [2, 11, 16, 17, 18, 19, 20].



Rys. 2. Silsoe cube w rozmiarze oryginalnym o boku 6 m oraz w skali 1:40 [17]

Względy bezpieczeństwa wymagają monitorowania budowli pracujących w szczególnie trudnych warunkach. Z tego powodu można spotkać się z wynikami badań obciążenia wiatrem drapaczy chmur zbudowanych w rejonach zagrożonych występowaniem gwałtownych i silnych wiatrów [23, 24].

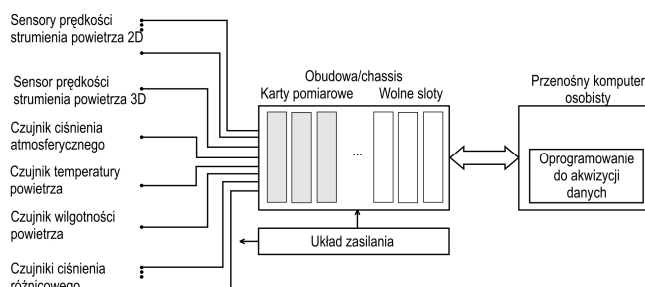
System do pomiaru oddziaływania wiatru na obiekty budowlane, będący przedmiotem niniejszego opracowania, przeznaczony jest do głównie do pomiaru prędkości strumienia powietrza i ciśnienia różnicowego. W odróżnieniu od zaawansowanych systemów pomiarowych stosowanych w tunelach aerodynamicznych, czy na stałe zamontowanych w np. wieżowcach, jest to system mobilny. Głównym zakresem jego zastosowań są pomiary oddziaływania wiatru na rusztowania budowlane. Rusztowanie jest z natury konstrukcją tymczasową. Wymaga od badaczy przeprowadzenia pomiarów w momencie istnienia tej konstrukcji. Dodatkowe problemy generuje środowisko pracy systemu tj. teren budowy charakteryzujący się wysokim zapyleniem, możliwością wystąpienia opadów atmosferycznych, możliwością wystąpienia drgań itp.

## 1. Mobilny system do pomiaru obciążenia wiatrem

### 1.1. Wymagania pomiarowe i struktura systemu

Wstępne wymagania w stosunku do systemu do pomiaru obciążenia wiatrem obiektów budowlanych zakładały, że system będzie posiadał niżej wymienioną funkcjonalność:

- pomiar prędkości strumienia powietrza w trzech płaszczyznach w minimum jednym punkcie (tzw. pomiar 3D),
- pomiar prędkości strumienia powietrza w dwóch płaszczyznach w minimum pięciu punktach (tzw. pomiar 2D),
- zakres pomiaru prędkości strumienia powietrza do  $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,
- pomiar ciśnienia generowanego przez strumień powietrza w minimum 16 punktach (pomiar ciśnienia różnicowego),
- pomiar ciśnienia atmosferycznego powietrza,
- pomiar wilgotności powietrza,
- pomiar temperatury powietrza,
- możliwość obsługi punktów pomiarowych oddalonych od punktu akwizycji danych o 30 metrów,
- szybkość akwizycji danych powinna być równa lub lepsza niż 20 próbek na sekundę w każdym z kanałów,
- oczekiwana niepewność pomiaru (dokładność sensorów) lepsza niż 1%,
- przenośność (mobilność) systemu pozwalająca na wielokrotne, bezpieczne transportowanie centralnej jednostki systemu,
- uwzględnienie konieczności prowadzenia w pomiarów w obiektach budowlanych (odporność na kurz, brak sterylnych warunków użytkowania urządzenia),
- możliwość rozbudowy systemu pod kątem sposobu komunikacji (komunikacja cyfrowa, sygnały prądowe), liczby punktów pomiarowych.



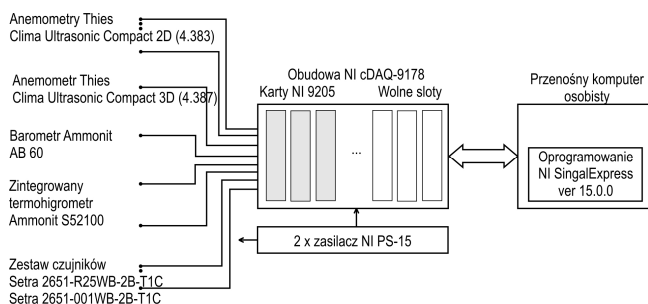
Rys. 3. Sugerowana struktura systemu pomiarowego

Jednym z możliwych rozwiązań w odniesieniu do prowadzenia pomiarów parametrów strumienia powietrza byłoby zastosowanie gotowych układów stosowanych w systemach meteorologicznych. Takie systemy charakteryzuje wysoka odporność na oddziaływanie zewnętrzne połączona z niską szybkością akwizycji danych. Szybkość aktualizacji danych jest także problemem w odniesieniu do pomiaru ciśnienia różnicowego powietrza. W tej grupie sensorów jedynie pojedyncze modele są w stanie aktualizować wyjście z częstotliwością 25 Hz (40 ms) i jednocześnie występować w wykonaniu przemysłowym pozwalającym na wysoką przenośność i prowadzenie pomiarów w obiektach przemysłowych. Kompromis pomiędzy wymaganiami pomiarowymi oraz możliwościami finansowymi zdeterminował prostą konfigurację systemu zaprezentowaną na rys. 3.

### 1.2. Elementy systemu

Struktura systemu ogólnie przedstawiona na rys. 3 została fizycznie zrealizowana poprzez zastosowanie elementów opisanych na rys. 4.

W kolejnych akapitach scharakteryzowano kluczowe elementy systemu pomiarowego zamieszczone na rys. 4. Pomiar prędkości strumienia powietrza realizowany jest za pomocą ultradźwiękowych anemometrów firmy Thies. W skład systemu wchodzi jeden anemometr 3D i pięć anemometrów 2D.



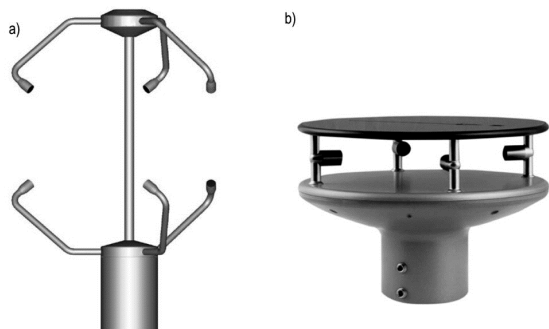
Rys. 4. Elementy systemu do pomiaru obciążenia wiatrem

Anemoemetr Thies Cima Ultrasonic Comcompact 3D, seria 4.383 (pomiar prędkości strumienia powietrza w trzech płaszczyznach) (rys. 5a):

- zakres pomiaru prędkości strumienia powietrza  $0,01-85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,
- próg czułości  $0,01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,
- maksymalna rozdzielczość  $0,01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,
- dokładność od  $\pm 0,1 \text{ m/s}$  (przy prędkościach mniejszych niż  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) do 3% (przy prędkościach zbliżonych do  $85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),
- zakres pomiaru kierunku strumienia powietrza  $0-360^\circ$ ,
- maksymalna rozdzielczość  $0,01^\circ$ ,
- dokładność od  $\pm 1^\circ$  (przy prędkościach zbliżonych do  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) do  $4^\circ$  (przy prędkościach zbliżonych do  $85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),
- częstotliwość aktualizacji wyjść analogowych  $7,5-256 \text{ ms}$ .

Anemoemetr Thies Cima Ultrasonic Comcompact 2D, seria 4.387 (pomiar prędkości strumienia powietrza w dwóch płaszczyznach):

- zakres pomiaru prędkości strumienia powietrza  $0,01-75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,
- próg czułości  $0,01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,
- maksymalna rozdzielczość  $0,01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,
- dokładność od  $\pm 0,1 \text{ m/s}$  (przy prędkościach mniejszych niż  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) do 3% (przy prędkościach zbliżonych do  $75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),
- zakres pomiaru kierunku strumienia powietrza  $0-360^\circ$ ,
- maksymalna rozdzielczość  $0,1^\circ$ ,
- dokładność od  $\pm 2^\circ$  (przy prędkościach większych niż  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),
- częstotliwość aktualizacji wyjść analogowych  $10 \text{ ms}$ .



Rys. 5. Widok anemoemetrów do pomiaru strumienia w 3 (a) i 2 (b) płaszczyznach

Barometr Ammonit AB 60 (pomiar ciśnienia atmosferycznego, rys. 6a):

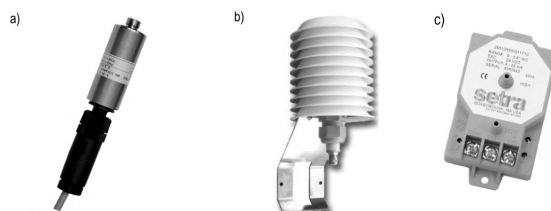
- zakres ciśnienia  $800 \div 1100 \text{ hPa}$ ,
- dokładność  $1,0\%$ ,
- zakres temperatury pracy  $(-40) \div (+85)^\circ\text{C}$ ,
- zakres wilgotności pracy  $0 \div 98 \text{ RH}$ .

Termohigrometr Ammonit S52100 (pomiar temperatury i ciśnienia powietrza, rys. 6b):

- pomiar temperatury w zakresie  $(-30) \div (+70)^\circ\text{C}$ ,
- dokładność  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ ,
- zakres pomiaru wilgotności  $0 \div 100 \text{ RH}$ ,
- dokładność  $\pm 2,0\%$ ,
- zakres temperatury pracy termohigrometru  $(-40) \div (+80)^\circ\text{C}$ .

Różnicowy dwukierunkowy czujnik ciśnienia gazu (powietrza) Setra 2651-R25WB-2B-T1C oraz Setra 2651-001WB-2B-T1C (rys. 6c):

- pomiar dwukierunkowy;
- zakres ciśnienia  $\pm 60 \text{ Pa}$  ( $\pm 0,25 \text{ cala}$  słupa wody, czujnik 2651-R25WB-2B-T1C);
- zakres ciśnienia  $\pm 250 \text{ Pa}$  ( $\pm 1,00 \text{ cal}$  słupa wody, czujnik 2651-001WB-2B-T1C);
- dokładność  $1,0\%$ ;
- stała czasowa  $50 \text{ ms}$  ( $20 \text{ Hz}$ );
- ciśnienia maksymalne, nieniszczące  $69 \text{ kPa}$  ( $10 \text{ PSI}$ );
- wytrzymała obudowa przemysłowa.



Rys. 6. Widok czujników parametrów powietrza: (a) barometr, (b) termohigrometr, (c) różnicowy czujnik ciśnienia powietrza

Wyspecyfikowane sensory dostarczają danych do jednostki centralnej odpowiedzialnej za akwizycję danych oraz przesyłanie ich do komputera osobistego. W związku z planowanym rozwojem systemu jako platformę sprzętową zastosowano uniwersalną obudowę pomiarową pozwalającą na montaż ośmiu modułów wejścia/wyjścia. Dwa sloty pomiarowe obudowy NI cDAQ-9178 (NI CompactDAQ 8-Slot USB Chassis) zostały wyposażone w dwie 32-wejściowe karty pomiarowe NI 9205. Czujniki wraz obudową pomiarową zasilane są przez zespół dwóch zasilaczy NI PS-15. Widok systemu akwizycji danych zamieszczono na rys. 7.



Rys. 7. Jednostka centralna systemu akwizycji danych

Karty pomiarowe NI 9205, stanowiące podstawę systemu, charakteryzują się poniższymi parametrami:

- wejścia analogowe: 32 jednobiegunowe lub 16 różnicowych,
- rozdzielczość 16 bitów,
- szybkość próbkowania  $250 \text{ kS/s}$ ,
- programowalne zakresy napięć wejściowych  $\pm 200 \text{ mV}$ ,  $\pm 1$ ,  $\pm 5$  oraz  $\pm 10 \text{ V}$ ,
- w zakresie  $\pm 200 \text{ mV}$ : czułość  $4 \mu\text{V}$ , dokładność  $174 \mu\text{V}$ ,
- w zakresie  $\pm 10 \text{ V}$ : czułość  $96 \mu\text{V}$ , dokładność  $6,23 \text{ mV}$ ,
- temperatura pracy  $(-40) \div (+70)^\circ\text{C}$ .

Wszystkie elementy (obudowa pomiarowa, karty, zasilacze, złącza) zostały trwale zamontowane w walizce pozwalającej na bezpieczny transport systemu. Zastosowanie trwałej i odpornej na uszkodzenia obudowy wymuszone jest trudnymi warunkami pracy. System dedykowany jest do badania obciążenia wiatrem rusztowań elewacyjnych. Konstrukcje te mają charakter tymczasowy i są najczęściej montowane wtedy, kiedy budynki są w stanie surowym. System pomiarowy jest wtedy umieszczany w przypadkowych lokalizacjach, bardzo często w miejscach o wysokim zapyleniu (rys. 8)



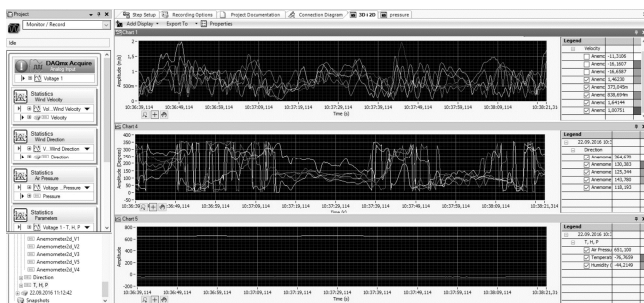
Rys. 8. System pomiarowy w typowych warunkach pracy

### 1.3. Oprogramowanie

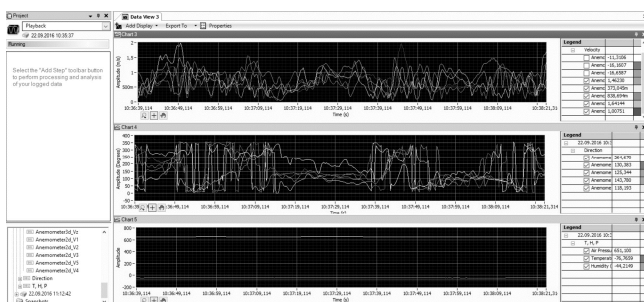
Zastosowana obudowa pomiarowa NI cDAQ-9178 oraz obie 32-wejściowe karty pomiarowe NI 9205 pochodzą od jednego producenta (National Instruments). Producent dystrybuje karty wraz ze sterownikami sprzętowymi pozwalającymi na przyłączenie, konfigurację oraz zbieranie danych. W związku z brakiem specjalnych wymagań w zakresie zbieranych danych jako platformę programistyczną zastosowano oprogramowanie tego samego producenta - National Instruments SignalExpress w wersji 15.0.0.

Środowisko pomiarowe opracowane na bazie SignalExpress pozwala na łatwe prowadzenie podstawowych operacji (uruchamianie rejestracji, zapis plików z danymi, odtwarzanie uprzednio zarejestrowanych danych). Większe możliwości daje występujących komplementarnie interfejs NI Measurement & Automation Explorer, dzięki któremu możliwa jest zmiana częstotliwości próbkowania, zmiana kolejność kanałów, zmiana wzmocnienia kanału, zmiana i dodawanie nowych kart pomiarowych.

Podstawowe okno systemu pomiarowego pozwala na obserwację danych dostępnych w kanałach pomiarowych (rys. 9). W lewej części okna deklarowane są zmienne wyświetlane na przebiegach czasowych. W odniesieniu do pomiaru wartości prędkości strumienia powietrza okno zawiera trzy przebiegi czasowe: wartości prędkości, kierunku strumienia oraz warunków środowiskowych (temperatury, wilgotności i ciśnienia powietrza). Eliminację wyświetlania poszczególnych serii danych prowadzi się za pomocą menu umieszczonego w prawej części panelu.



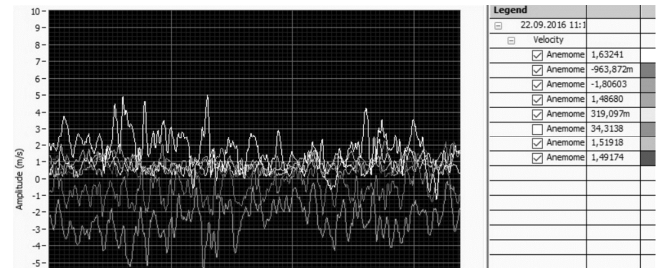
Rys. 9. Rejestracja danych



Rys. 10. Odtwarzanie zarchiwizowanych danych

Do obserwacji zarejestrowanych danych służy interfejs identyczny do wykorzystywanego przy zapisie. Grupa wyników identyfikowana na podstawie daty i czasu zapisu może być wyświetlana na trzech przebiegach czasowych. Podobnie jak przy zapisie, można „wygaszać” niepożądane przebiegi.

W związku z wysokim upakowaniem danych w jednostce czasu istnieje możliwość płynnego powiększania dowolnego z trzech przebiegów czasowych (rys. 11).



Rys. 11. Szczegółowe dane o serii pomiarów

Wyniki prezentowane w czasie zapisu i odczytu danych mają jedynie znaczenie kontrolne. Okna aplikacji pozwalają na obserwację bieżących zmian sygnału. Umożliwiają kontrolę poprawności zapisu danych. Ostatecznie zarejestrowane dane są eksportowane i podlegają obróbce za pomocą oprogramowania zewnętrznego.

## 2. Wyniki badań pilotażowych

### 2.1. Charakterystyka badanego obiektu

System został zaprojektowany i uruchomiony w połowie roku 2016. Od tego momentu został przetestowany w kilkudziesięciu lokalizacjach na terenie całej Polski. Na rys. 12 zaprezentowano czteropiętrowy budynek z rusztowaniem fasadowym. Obiekt zlokalizowany jest w Lublinie przy ulicy Melomanów. Pomiary prowadzone były w 26 lipca 2016 w godzinach 11:00–14:00. Białe okręgi z rys. 12 oznaczają miejsca instalacji czujników prędkości strumienia powietrza. Same czujniki zaprezentowano na rys. 13.



Rys. 12. Obiekt z zaznaczonymi punktami montażu czujników

Zastosowane ultradźwiękowe czujniki prędkości strumienia powietrza zapewniają większą czułość i dokładność niż typowe czujniki mechaniczne z turbiną. Poza wykrywaniem prędkości strumienia udostępniana jest informacja o kierunku strumienia niedostępna w prostych czujnikach turbinowych.

Wadą czujników ultradźwiękowych jest ich masa oraz grubość i sztywność kabla przyłączeniowego dostarczanego przez producenta. Masa nie jest przeszkodą przy stacjonarnym stosowaniu czujników (budynki mieszkalne, porty, skocznie narciarskie maszty statków i łodzi). W przypadku, kiedy wymagany jest transport czujników wraz z okablowaniem, zaś w obiektach, które są w budowie nie ma wind i zabezpieczeń schodów, tak nieistotny element jak masa systemu pomiarowego

zaczyna mieć wpływ na czas uruchomienia systemu. Jednocześnie należy pamiętać, że czujniki montowane są na, z natury niebezpiecznych, rusztowaniach.



Rys. 13. Czujnik prędkości powietrza 2D zamontowany na badanym obiekcie

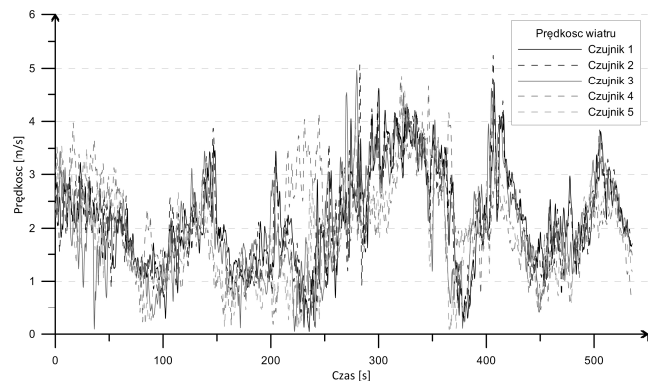
Montaż czujników prowadzony był tak, aby czujniki rozmieszczone były na całej długości rusztowania elewacyjnego. Oczekiwano, że czujniki umiejscowione przy ścianach bocznych budynku zarejestrują wartości maksymalne. Czujniki wewnątrz miały dostarczyć danych pozwalających na wyznaczenie izol linii obciążenia rusztowania elewacyjnego wiatrem.



Rys. 14. Grupa czujników zamontowana na rusztowaniu elewacyjnym

## 2.2. Wyniki pomiarów

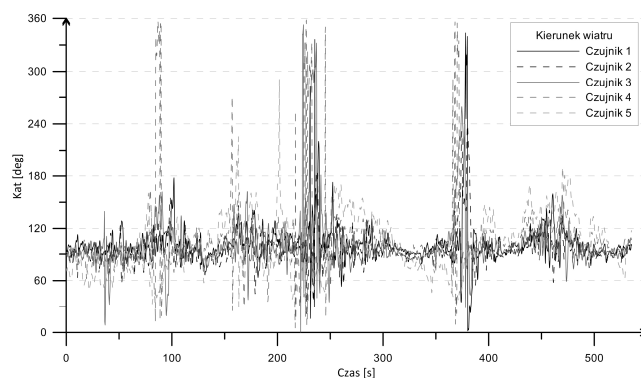
Pomiary prowadzone były w kilku i kilkunastominutowych odcinkach pomiędzy godziną 11:00 a 14:00. W trakcie pomiarów możliwa jest obserwacja wartości bieżących na panelu systemu pomiarowego przedstawionym na rys. 9. Prowizoryczne warunki usytuowania komputera, przypadkowe nasłonecznienie ekranu oraz zapylenie w trakcie prowadzenia pomiarów w obiekcie budowlanym powodują, że proces pomiarowy ograniczony jest do akwizycji danych, zaś ich analiza prowadzona jest po zejściu z obiektu.



Rys. 15. Wyniki pomiarów prędkości wiatru dla grupy czujników

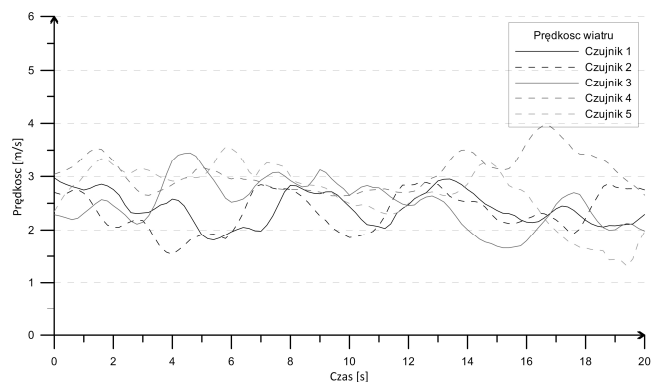
Na rysunkach 15 i 16 zamieszczono grupowe zestawienia danych dla wszystkich czujników. Okres prowadzenia pomiarów wynosił 9 minut. Wykonywano 5 pomiarów na sekundę w

każdym z kanałów. System testowany był do pracy z typową prędkością 25 pomiarów na sekundę na kanał. Zbiorcze zestawienia wyników prędkości wiatru oraz kierunku wiatru w funkcji czasu dla długich okresów rejestracji są nieczytelne. Można za ich pomocą obliczać wartości średnie za dowolnie wybrany okres (np. 10 min zgodny z Eurokod) oraz wykrywać szczytowe wartości prędkości i kąta. W rejestrowanym okresie wartość średnia prędkości powietrza we wszystkich kanałach wyniosła  $2,07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  przy rozrzucie w kanałach  $\pm 0,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Podobnie wartość średnia kąta (kierunku) strumienia powietrza liczona w odniesieniu do północy geograficznej wynosiła  $101,0^\circ$  przy rozrzucie wartości średniej pomiędzy kanałami  $\pm 6,0^\circ$ . Charakterystycznym zarejestrowanym efektem są gwałtowne zmiany kierunku wiatru połączone z jego niską prędkością (zmiany kierunku w zakresie  $0-360^\circ$ , kiedy prędkość ma niską wartość). Takie efekty wystąpiły tutaj około 90, 160, 220 i 380 sekundy.

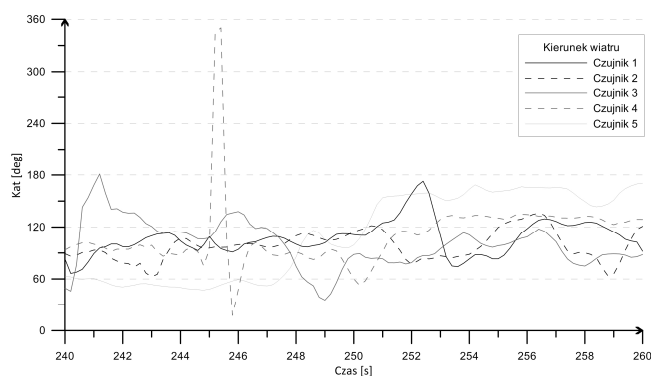


Rys. 16. Wyniki pomiarów kierunku wiatru dla grupy czujników

W przypadku wykrycia specyficznego zachowania obiektu lub obciążenia wiatrem możliwa jest bardziej szczegółowa analiza. Jej progiem jest częstotliwość próbkowania kanału. Na rysunkach 17 i 18 przedstawiono „powiększony” 20 sekundowy fragment przebiegów czasowych prędkości i kierunku strumienia wiatru.

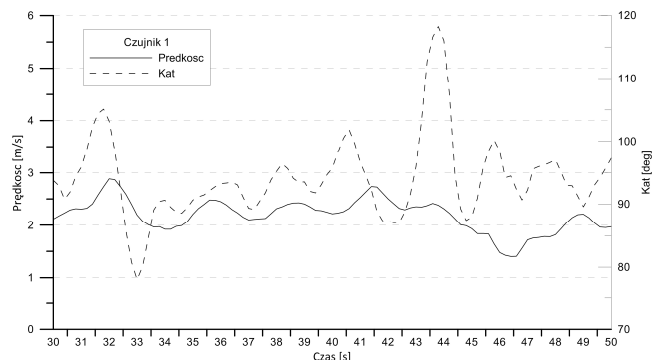


Rys. 17. Prędkość wiatru w funkcji czasu dla odcinka o długości 20 sekund



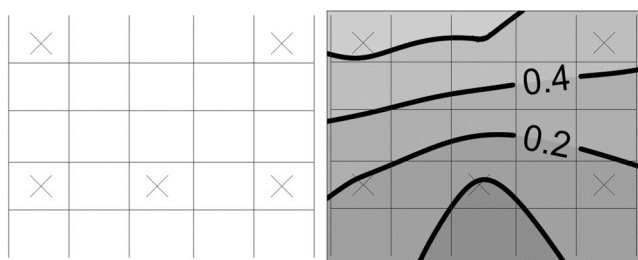
Rys. 18. Kierunek wiatru w funkcji czasu dla odcinka o długości 20 sekund

Analizę danych można prowadzić pod kątem zachowania kierunku i strumienia wiatru w pojedynczych punktach pomiarowych (rys. 19). Dzięki porównaniu danych z czujników zlokalizowanych na krawędziach i wewnątrz rusztowania będzie można wnioskować o charakterze obciążeń wiatrem. Wyniki pomiarów kierunku wiatru charakteryzujące się dużą zmiennością kierunku potwierdzają hipotezę o burzliwości przepływu w otoczeniu budynków.



Rys. 19. Zestawienie prędkości i kierunku wiatru dla pojedynczego czujnika

Zarejestrowane wartości prędkości wiatru pozwalają sporządzić izotachy (izolinie prędkości wiatru) pozwalające na obserwację obciążenia wiatrem całych powierzchni (rys. 20).



Rys. 20. Przykładowe izolinie prędkości strumienia wiatru na elewacji budynku (na podstawie pomiarów prędkości wiatru w wybranej chwili i wybranych punktach rusztowania)

### 3. Podsumowanie

Podstawową metodą wyznaczania obciążenia wiatrem budynków i budowli oraz ich części są normy. W zależności od sposobu szacowania parametrów obiektu i jego otoczenia można uzyskać zróżnicowane wyniki. Z tego powodu do projektowania i weryfikowania obciążenia wiatrem wykorzystuje się metody numeryczne CFD (Computational Fluid Mechanics). Inną opcją weryfikacji obciążenia jest sporządzenie modelu i badanie w tunelu aerodynamicznym. Praktyczna weryfikacja projektów przeprowadzana jest badaniem rzeczywistych obiektów (*in situ*).

Przedstawiony w niniejszej pracy system do pomiarów obciążenia wiatrem rusztowań elewacyjnych pozwala na:

- pomiar strumienia powietrza w 3 płaszczyznach (1 punkt),
- pomiar strumienia w 2 płaszczyznach w (5 punktów),
- pomiar ciśnienia różnicowego w 16 punktach,
- pomiar ciśnienia, wilgotności i temperatury powietrza.

Za jego pomocą prowadzono pomiary obciążenia wiatrem rusztowań elewacyjnych w okresie lipiec-wrzesień 2016. Rejestrowane dane mają postać przedstawioną w rozdziale 2. System sprawdził się w mobilnych pomiarach wielopunktowych prędkości i kierunku wiatru.

Aktualne plany rozwojowe to:

- przetestowanie systemu zbierania danych z różnicowych czujników ciśnienia na obiekcie rzeczywistym,
- rozbudowa liczby różnicowych czujników ciśnienia,
- opracowanie oryginalnej, elastycznej aplikacji pomiarowej w środowisku LabVIEW (National Instruments).

### Literatura

- [1] Al-Quraan A., Stathopoulos T., Pillay P.: Comparison of wind tunnel and on site measurements for urban wind energy estimation of potential yield. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 158, 2016, 1–10.
- [2] Bartko M., Molleti S., Baskaran A.: In situ measurements of wind pressures on low slope membrane roofs. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 153, 2016, 78–91.
- [3] Blocken B.: Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Building and Environment*, vol. 91, 2015, 219–245.
- [4] Churin P., Pomelov V., Poddaeva O.: The Research of Wind Loads on Buildings and Structures with Increased Level of Responsibility. *Procedia Engineering*, vol. 153, 2016, 550–555.
- [5] Dalglish W.A., Cooper K.R., Templin J.T.: Comparison of model and full scale accelerations of a high-rise building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 13/1983, 217–228.
- [6] Dalglish W.A.: Comparison of model/full scale wind pressures on a high-rise building. *Journal of Industrial Aerodynamics*, vol. 1/1975, 55–66.
- [7] Dziwiński M.: Obciążenia wiatrem rusztowań budowlanych. *Materiały Budowlane*. 12/2012, 52.
- [8] Gholamalizadeh E., Kim M-H.: CFD (computational fluid dynamics) analysis of a solar-chimney power plant with inclined collector roof. *Energy*, vol. 10, 2016, 661–667.
- [9] Gong B., Wang Z., Li Z., Zhang J., Fu X.: Field measurements of boundary layer wind characteristics and wind loads of a parabolic trough solar collector. *Solar Energy*, vol. 86, 6/2012, 1880–1898.
- [10] Jamińska P.: Praca statyczna rusztowania pod działaniem rzeczywistego oraz normowego obciążenia wiatrem. *Budownictwo i Architektura* 13(2)/2014, 341–348.
- [11] Kasperski M., Hoxey R.: Extreme-value analysis for observed peak pressures on the Silsoe cube. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 96, 6–7/2008, 994–1002.
- [12] Li Q., Maeda T., Kamada Y., Murata J., Kawabata T., Shimizu K., Ogasawara T., Nakai A., Kasuya T.: Wind tunnel and numerical study of a straight-bladed vertical axis wind turbine in three-dimensional analysis (Part I: For predicting aerodynamic loads and performance. *Energy* vol 106, 2016, 443–452.
- [13] Lipecki T.: Struktura wiatru i badania modelowe obciążenia wiatrem budowli prostopadłościennych. *Politechnika Lubelska, Lublin* 2015.
- [14] Mora-Pérez M., Guillén-Guillamón I., Amparo López-Jiménez P.: Computational analysis of wind interactions for comparing different buildings sites in terms of natural ventilation. *Advances in Engineering Software*, vol. 88, 2015, 73–82.
- [15] Mousaad Aly A.: On the evaluation of wind loads on solar panels: The scale issue. *Solar Energy* vol. 135, 2016, 423–434.
- [16] Richards P., Norris S.: LES modelling of unsteady flow around the Silsoe cube. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 144, 2015, 70–78.
- [17] Richards P.J., Hoxey R.P., Connell B.D., Lander D.P.: Wind-tunnel modelling of the Silsoe Cube. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 95, 9–11/2007, 1384–1399.
- [18] Richards P.J., Hoxey R.P.: Wind loads on the roof of a 6m cube. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 96/2008, 984–993.
- [19] Richardson G.M., Hoxey R.P., Robertson A.P., Short J.L.: The Silsoe Structures Building: Comparisons of pressures measured at full scale and in two wind tunnels. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 72, 1997, 187–197.
- [20] Richardson G.M., Surry D.: The Silsoe structures building: Comparison between full-scale and wind-tunnel data. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 51, 2/1994, 157–176.
- [21] Smith D.J., Masters F.J., Chowdhury A.G.: Investigating a wind tunnel method for determining wind-induced loads on roofing tiles. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* vol. 155, 2016, 47–59.
- [22] Yan B., Li Q.S.: Wind tunnel study of interference effects between twin super-tall buildings with aerodynamic modifications. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 156, 2016, 129–145.
- [23] Yi J, Li Q.S.: Wind tunnel and full-scale study of wind effects on a super-tall building. *Journal of Fluids and Structures*, vol. 58, 2015, 236–253.
- [24] Yi J, Zhang J.W., Li Q.S.: Dynamic characteristics and wind-induced responses of a super-tall building during typhoons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 121/2013, 116–130.
- [25] Żurański J.A., Gaczek M.: Obciążenie wiatrem budynków w ujęciu normy PN-EN 1991-1-4:2008. *Inżynieria i Budownictwo* 9/2010, 494–501.
- [26] PN-EN 1991-1-4:2008: Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru. *Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa* 2008.

Dr inż. Andrzej Sumorek  
e-mail: a.sumorek@pollub.pl

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Tam w 1999 roku uzyskał tytuł doktora nauk technicznych i pracował do 2014 roku. Aktualnie adiunkt w Katedrze Mechaniki Budowli Politechniki Lubelskiej i kierownik Centralnego Laboratorium Budownictwa. Kierunki prac badawczych i zainteresowań: zastosowanie technologii wykorzystujących pole elektromagnetyczne w urządzeniach przemysłowych, programowanie w środowisku graficznym (LV).

