

doi:10.15199/48.2022.12.55

Wykorzystanie niskobudżetowego systemu czujników do pomiaru jakości powietrza na terenie kampusu uczelni

Streszczenie W pracy przedstawiono sposób wykorzystania niskobudżetowego systemu czujników do pomiaru jakości powietrza i akwizycji danych. Terenem badań był obszar Kampusu Politechniki Lubelskiej. Opracowany system pomiarowy umożliwia monitorowanie i rejestrację: koncentracji cząstek materii (PM1.0, PM2.5, PM10), temperatury, ciśnienia, wilgotności powietrza. Pomiar zanieczyszczeń: PM1.0, PM2.5, PM10 jest oparty o metodę rozpraszania wiązki światła. Dokonano pomiaru zużycia energii elektrycznej i określono maksymalny czas pracy systemu. Wyniki pomiarów zanieczyszczeń PM2.5 i PM10 zestawiono z danymi dostępnymi z lokalnej stacji pomiaru jakości powietrza.

Abstract. The paper presents a method of using a low-cost sensor system for air quality measurement and data acquisition. The research area was the Campus of the Lublin University of Technology. The developed measuring system enables the monitoring and registration of the concentration of particulate matter (PM1.0, PM2.5, PM10), temperature, pressure, air humidity. Pollution measurement: PM1.0, PM2.5, PM10 is based on the light beam scattering method. The electricity consumption was measured and the maximum system operation time was determined. The results of measurements of PM2.5 and PM10 pollutants were compared with the data available from the local air quality measurement station (**Application of low-cost sensor system to measure air quality on the university campus**).

Słowa kluczowe: czujniki niskobudżetowe, cząsteczki zawieszane, pomiar zanieczyszczeń

Keywords: low-cost sensors, particulate matter, pollution measurement

Wprowadzenie

Jakość otaczającego powietrza jest kluczowa dla rozwoju i zdrowia człowieka. Wiele opracowań [1, 2, 3, 4] wskazuje na bezpośredni koszt zdrowotny i finansowy dla człowieka związany z zanieczyszczeniem powietrza. W opracowaniu przygotowanym przez Bank Światowy wskazuje się, że przedwczesne śmierci, związane z ekspozycją na cząsteczki o średnicy do 2,5 μm (*ang. particulate matter*, PM2.5) przeliczono na wartość 4% produktu krajowego brutto dla krajów Europy i Azji Centralnej [1]. Zauważalna jest korelacja pomiędzy zwiększoną koncentracją zanieczyszczeń PM2.5 a chorobami układu oddechowego [3]. Zwiększona koncentracja cząsteczek zawieszonych w powietrzu jest problemem zwłaszcza w dużych aglomeracjach [4].

Jakość powietrza można monitorować w sposób ciągły (np. przez stacjonarną stację pomiaru) lub okresowy (np. przez mobilną stację pomiaru). W Polsce instytucją sprawującą kontrolę nad jakością powietrza jest Główny Inspektorat Ochrony Środowiska (GIOS) [5, 6, 7], który realizuje program Państwowego Monitoringu Środowiska. Wspomniana instytucja opracowała zalecany Polski Indeks Jakości Powietrza, który w prosty sposób obrazuje jakość powietrza dla danego rodzaju zanieczyszczenia. W skład wspomnianego indeksu zalicza się następujące zanieczyszczenia:

- PM1.0 – wskaźnik określający ilość cząsteczek (np. pyły) lub kropli (np. zawiesiny) o średnicy do 1,0 μm ,
- PM2.5 – wskaźnik określający ilość cząsteczek (np. pyły) lub kropli (np. zawiesiny) o średnicy do 2,5 μm ,
- PM10 – wskaźnik określający ilość cząsteczek (np. pyły) lub kropli (np. zawiesiny) o średnicy do 10 μm ,
- O₃ – wskaźnik zawartości ozonu,
- NO₂ – wskaźnik zawartości dwutlenku azotu,
- SO₂ – wskaźnik zawartości dwutlenku siarki,
- C₆H₆ wskaźnik zawartości benzenu,
- CO – wskaźnik zawartości tlenku węgla.

Powyższe wskaźniki opisuje się za pomocą zawartości zanieczyszczeń w danej jednostce objętości – $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Wskaźniki są odnoszone do średniej wartości w danym przedziale czasu. GIOS udostępnia publicznie dane w interwale godzinowym. Wyniki te umożliwiają w prosty sposób określenie stanu powietrza w bieżącej chwili czasu

w odniesieniu do odpowiedniego rodzaju zanieczyszczeń. W tabeli poniżej przedstawiono poziomy indeksu jakości powietrza opracowane przez GIOS:

Tabela 1. Poziomy indeksu jakości powietrza opracowanego przez Główny Inspektorat Ochrony Środowiska (GIOS) [5]

Indeks jakości powietrza	PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	PM2,5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	O ₃ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	NO ₂ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	SO ₂ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Bardzo dobry	0 - 20	0 - 13	0 - 70	0 - 40	0 - 50
Dobry	20,1 - 50	13,1 - 35	70,1 - 120	40,1 - 100	50,1 - 100
Umiarkowany	50,1 - 80	35,1 - 55	120,1 - 150	100,1 - 150	100,1 - 200
Dostateczny	80,1 - 110	55,1 - 75	150,1 - 180	150,1 - 230	200,1 - 350
Zły	110,1 - 150	75,1 - 110	180,1 - 240	230,1 - 400	350,1 - 500
Bardzo zły	> 150	> 110	> 240	> 400	> 500
Brak indeksu	Indeks jakości powietrza nie jest wyznaczony z powodu braku pomiaru zanieczyszczenia dominującego w województwie.				

Na podstawie zebranych danych można wyznaczyć ekspozycję na dany rodzaj zanieczyszczenia w skali roku. Normy i terminy wprowadzania nowych limitów zanieczyszczeń zostały określone w Dyrektywie Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/50/WE [8]. Obecne limity zanieczyszczeń dla wybranych typów substancji przedstawiono w tabeli poniżej [9]:

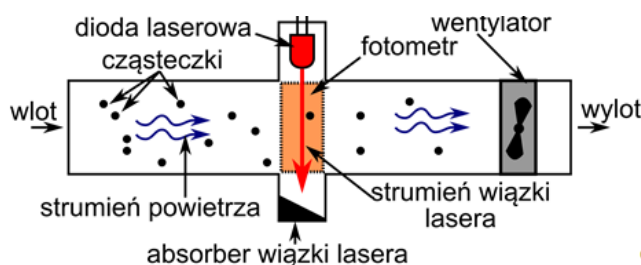
Tabela 2. Dopuszczalny poziom stężenia wybranych zanieczyszczeń w powietrzu według prawa polskiego [8]

Nazwa substancji	Okres uśredniania wyników pomiarów	Poziom dopuszczalny $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Pył PM2,5	rok kalendarzowy	20
	24 godziny	50
Pył PM10	rok kalendarzowy	40
	1 godzina	200
Dwutlenek azotu (NO ₂)	rok kalendarzowy	40
	1 godzina	350
Dwutlenek siarki (SO ₂)	24 godziny	125
	rok kalendarzowy	5
Tlenek węgla (CO)	8 godzin	10 000

Metody pomiaru pyłów zawieszonych PM2.5 i PM10 można podzielić na dwa rodzaje [8, 9, 10]:

- metoda referencyjna (grawimetryczna), polegająca na zasysaniu powietrza do specjalnych poborników pyłowych, w których zamontowane są czyste filtry. Następnie dokonuje się pomiaru masy zebranych na filtrach zanieczyszczeń [11, 12].
- metoda automatyczna (ciągła), pozwala na pomiar ciągły w czasie (bez dokonywania przerw) [10]. Aby dane urządzenie było dopuszczone do pomiaru powinno posiadać certyfikat spełnienia równoważności do metody referencyjnej. Przykładami metod automatycznych jest: pomiar metodą wagi oscylacyjnej, pomiar tłumienia cząstek β , pomiar rozpraszania wiązką światła [10].

Pomiar rozpraszania (dyfrakcji) światła polega, w pierwszym etapie, na kierowaniu wiązki światła (np. laserowego) na strumień przepływającego powietrza wewnątrz specjalnej komory. Duże cząsteczki rozpraszają wiązkę laserową pod małym kątem, natomiast małe cząsteczki rozpraszają wiązkę lasera pod dużym kątem. Następnie określana jest wielkość cząsteczek na podstawie zmiany natężenia światła rozproszonego w funkcji kąta rozpraszającego. W celu uzyskania wyniku stosuje się rozwiązanie Mie [13]. Poniżej przedstawiono schemat poglądowy miernika do pomiaru cząsteczek za pomocą metody rozpraszania wiązką światła:



Rys. 1. Schemat układu do pomiaru gęstości cząsteczek zawieszonych w powietrzu za pomocą metody rozpraszania wiązki światła laserowego

W pracy przyjęto metodę pomiaru wykorzystującą rozpraszanie wiązki światła. Wybór uzasadniono prostotą systemu pomiarowego i dość dobrze opisaną w literaturze metodą pomiaru [14, 15, 16, 17].

Celem niniejszej publikacji jest wykorzystanie niskobudżetowego i modułowego systemu do pomiaru jakości powietrza. Za obszar badań przyjęto Kampus Politechniki Lubelskiej.

System pomiarowy

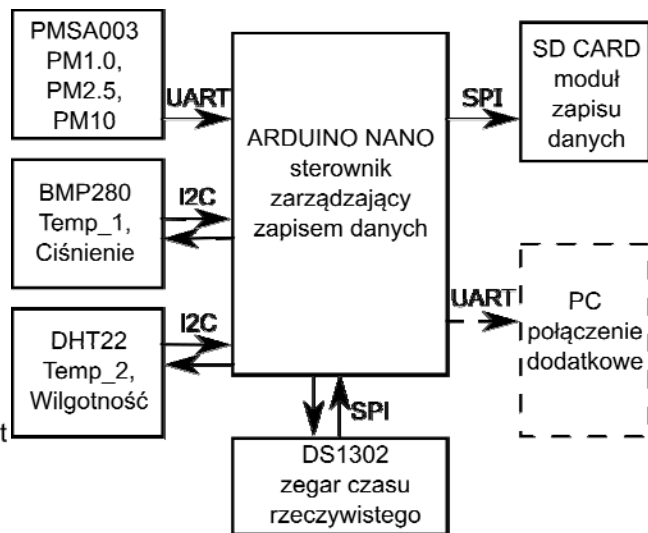
Do badań wykorzystano czujnik PMSA003, który został zastosowany w mobilnym systemie jako czujnik zanieczyszczeń: PM1.0, PM2.5, PM10. Dodatkowo system umożliwia pomiary: temperatury, ciśnienia bezwzględnego i wilgotności powietrza. Wykaz czujników i wielkości mierzonych przedstawiono we Tabeli 3.

Z uwagi na wstępny charakter badań skupiono się wyłącznie na pomiarze zanieczyszczeń opisywanych wskaźnikami: PM1.0, PM2.5 i PM10. Czujniki BMP280 i DHT22 zostały zastosowane w celu określenia warunków atmosferycznych danego dnia pomiarowego.

Jednostką sterującą systemem był moduł Arduino Nano. System wyposażono w zegar czasu rzeczywistego: DS1302 RTC oraz moduł zapisu danych na kartę SD. System był zasilany za pomocą 3 baterii typu Li-Po (500 mAh, 3,7V) połączonych szeregowo. Poniżej przedstawiono schemat systemu pomiarowego:

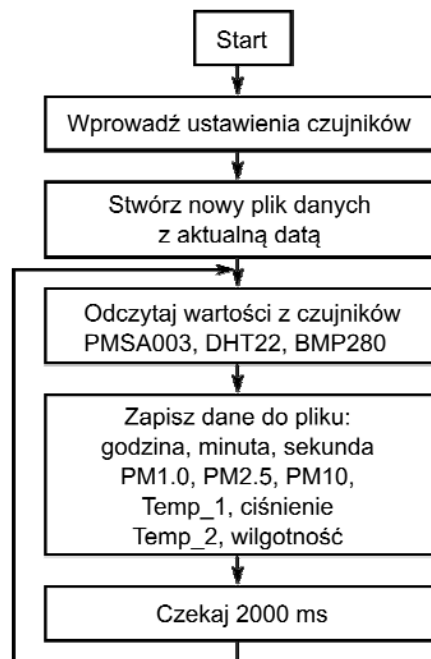
Tabela 3. Podstawowe parametry zastosowanych czujników w systemie pomiarowym

Rodzaj czujnika	Mierzona wielkość	Zakres	Rozdzielczość	Jednostka
PMSA003	PM1.0	0-500	1,0	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
	PM2.5	0-1000		
	PM10	b.d.		
BMP280	Temperatura (Temp_1)	-40...+85	0.01	$^{\circ}\text{C}$
	Ciśnienie bezwzględne	300-1100	0.16	hPa
DHT22	Temperatura (Temp_2)	-40...+80	0.1	$^{\circ}\text{C}$
	Wilgotność	0-100	0,1	%



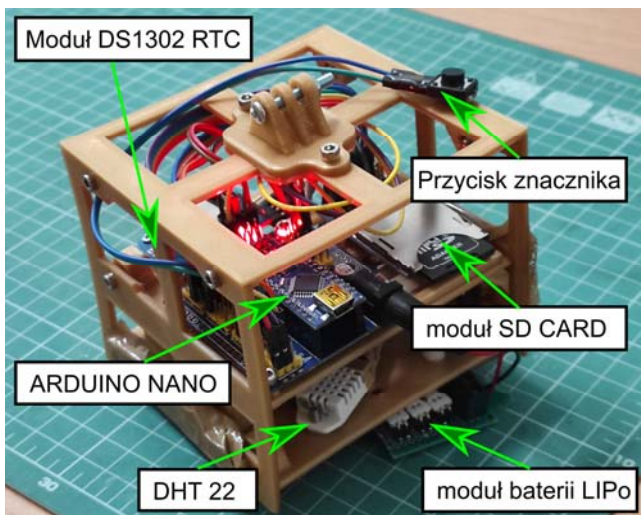
Rys. 2. Schemat systemu pomiarowego, wraz z oznaczonymi protokołami komunikacyjnymi

W trakcie wykonywania oprogramowania wykorzystano ogólnodostępne biblioteki. Rozwiązanie takie umożliwia łatwe modyfikowanie lub dodawanie czujników do systemu pomiarowego. Aplikacja zajmuje 80% pamięci modułu Arduino Nano. Poniżej przedstawiono algorytm działania aplikacji sterującej pomiarem:



Rys. 3. Algorytm akwizycji danych pomiarowych

Obudowa systemu została zaprojektowana w taki sposób by całość elementów elektronicznych można było zmieścić w sześcianie o wymiarach 10x10x10 cm. W projekcie uwzględniono swobodny dostęp powietrza do środka obudowy, która pełniła rolę szkieletu dla modułów elektronicznych. Obudowę wydrukowano na drukarce 3D z materiału PLA. Dodatkowo obudowa została wyposażona w mocowanie umożliwiające przemieszczanie np. z wykorzystaniem pojazdu lub drona bez stacjonarnego źródła zasilania. Masa całego systemu razem z obudową wynosi: 234 g. Do modułu sterownika dołączony został przycisk, który pełnił rolę znacznika. Na podstawie zapisanej wartości znacznika była możliwa szybka analiza danych pomiarowych. Na rysunku poniżej przedstawiono zdjęcie całego systemu.



Rys. 4. Zdjęcie niskobudżetowego systemu do pomiaru jakości powietrza. Pozostałe niewidoczne elementy systemu: PMSA003, BMP280, znajdujący się na tym samym poziomie co czujnik DHT22.

Koszty poszczególnych elementów/modułów systemu przedstawiono w tabeli poniżej:

Tabela 4. Koszty systemu pomiarowego (stan na maj 2022)

Lp.	Nazwa podzespołu	Koszt
1	czujnik: PMSA003	117,00 zł
2	czujnik: BMP280	19,90 zł
3	czujnik: DHT22	37,70 zł
4	moduł czytnika kart SD	8,90 zł
5	karta SD 32GB	28,90 zł
6	zegar czasu rzeczywistego DS1302 RTC	19,00 zł
7	baterie LiPo 3szt. 500mAh, 3,7V	45,00 zł
8	sterownik Arduino Nano	45,00 zł
9	moduł rozszerzeń do Arduino Nano	11,30 zł
10	przewody	10,00 zł
11	drukowana obudowa (wyłącznie koszt materiału PLA)	5,00 zł
Koszt całkowity =		347,70 zł

Wyniki pomiarów

Wybrano 4 lokalizacje pomiarowe na obszarze Kampusu Politechniki Lubelskiej:

- Przy budynku Wydziału Elektrotechniki i Informatyki, w pobliżu parking uczelniany oraz ulica Nadbystrzycka o dużej intensywności ruchu znajdująca się 40m od punktu pomiaru, 182,5 m n.p.m.
- Przy wejściu głównym do budynku Centrum Innowacji i Zaawansowanych Technologii (CIIZT), w pobliżu parking uczelniany i tereny zielone, 185 m n.p.m.

3. Przy wjeździe na parking uczelniany za budynkiem Wydziału Inżynierii Środowiska, w pobliżu droga oraz skupisko domów jednorodzinnych, 176 m n.p.m.

4. Przy ulicy Nadbystrzyckiej, w pobliżu skrzyżowania ulicą Nowomiejską. Pomiar dokonywany w odległości 10 m od osi drogi, 183,6 m n.p.m.

Pomiary były realizowane w sposób ciągły tzn. bez przerywania pomiaru w celu zmiany lokalizacji. W każdej lokalizacji przeprowadzono 3 minutowy postój celem zebrania danych. Przejście całej trasy zajmowało ok. 25 min. wraz z postojami. Badania przeprowadzono w terminie od 25 do 29 kwietnia 2022 r. w godzinach pomiędzy 13:00 a 14:00. Miejsca, w których przeprowadzano pomiary przedstawiono na rysunku poniżej.



Rys. 5. Lokalizacja punktów pomiarowych na terenie Kampusu Politechniki Lubelskiej.

Pozyskane dane z systemu posiadały surową formę tzn. nie sprawdzały poprawności całej ramki danych (tj. wartość czasu czy wielkość mierzona). Zebrane dane zostały poddane analizie sprawdzającej poprawność zapisu danych w autorskiej aplikacji w środowisku LabVIEW. Miało to na celu wyeliminowania potencjalnych błędów nadmiarowych powstałych na skutek np. zapisu niekompletnej ramki danych.

Pomiar natężenia prądu pobieranego z baterii, przez system do pomiaru zanieczyszczeń, zarejestrowano za pomocą multimetru Agilent 34461A.

Poniżej przedstawiono wyniki pomiarów jakości powietrza dla w/w lokalizacji na terenie Kampusu Politechniki Lubelskiej:

Tabela 5. Średnia wartość (M) i odchylenie standardowe średniej (SDm) parametru PM1.0 dla wybranych lokalizacji na terenie Kampusu Politechniki Lubelskiej

Data	-	PM 1.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$			
		Lokalizacja			
		1	2	3	4
25.04	M	7,13	8,59	9,48	9,78
	SDm	0,11	0,15	0,23	0,10
26.04	M	11,43	13,80	15,86	13,44
	SDm	0,18	0,10	0,21	0,22
27.04	M	9,51	11,81	12,00	14,36
	SDm	0,14	0,13	0,15	0,34
25.08	M	11,98	6,57	7,65	8,50
	SDm	0,68	0,09	0,14	0,17
29.04	M	5,98	6,22	6,19	6,74
	SDm	0,10	0,14	0,07	0,13

Tabela 6. Średnia wartość (M) i odchylenie standardowe średniej (SDm) parametru PM2.5 dla wybranych lokalizacji na terenie Kampusu Politechniki Lubelskiej

PM2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$					
Data	-	Lokalizacja			
		1	2	3	4
25.04	M	8,64	11,32	11,74	11,99
	SDm	0,24	0,28	0,35	0,23
26.04	M	14,29	18,37	22,73	18,74
	SDm	0,32	0,28	0,44	0,46
27.04	M	12,11	16,19	15,07	20,24
	SDm	0,30	0,25	0,33	0,56
25.08	M	16,62	7,78	9,39	10,12
	SDm	1,27	0,17	0,24	0,27
29.04	M	6,83	7,62	6,68	8,16
	SDm	0,17	0,25	0,13	0,22

Tabela 7. Średnia wartość (M) i odchylenie standardowe średniej (SDm) parametru PM10 dla wybranych lokalizacji na terenie Kampusu Politechniki Lubelskiej

PM10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$					
Data	-	Lokalizacja			
		1	2	3	4
25.04	M	9,99	12,79	13,08	13,58
	SD	0,36	0,47	0,50	0,36
26.04	M	15,25	19,16	24,66	19,44
	SD	0,44	0,39	0,66	0,56
27.04	M	12,98	16,75	17,17	22,21
	SD	0,45	0,33	0,51	0,75
25.08	M	19,21	8,87	11,06	12,16
	SD	1,70	0,29	0,42	0,45
29.04	M	8,08	8,22	7,39	9,78
	SD	0,32	0,33	0,21	0,34

Tabela 8. Średnie wartości stężenia pyłów zawieszonych PM1.0, PM2.5 i PM10 z 5 dni dla danej lokalizacji na terenie Kampusu Politechniki Lubelskiej

Parametr	Jednostka	Lokalizacja			
		1	2	3	4
PM1.0	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	9,21	9,40	10,24	10,56
PM2.5	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	11,70	12,26	13,12	13,85
PM10	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	13,10	13,16	14,67	15,43

Tabela 9. Średnie wartości dla mierzonych wielkości dla Kampusu Politechniki Lubelskiej dla kolejnych dni pomiaru

Parametr	Jednostka	Data				
		25.04	26.04	27.04	28.04	29.04
PM1.0	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	8,74	13,63	11,92	8,68	6,28
PM2.5	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	10,92	18,53	15,90	10,98	7,32
PM10	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	12,36	19,63	17,28	12,83	8,37
Temp_1	$^{\circ}\text{C}$	18,95	12,85	15,62	16,82	15,84
Ciśnienie*	hPa	985,2	995,6	1001,8	1005,1	1006,6
Ciśnienie zred.**	hPa	1006,2	1017,3	1023,4	1026,7	1028,3
Temp_2	$^{\circ}\text{C}$	19,4	14,0	15,8	17,1	16,3
Wilgotność	%	22,8	30,7	24,1	19,6	14,6

* ciśnienie bezwzględne

** ciśnienie zredukowane do poziomu morza

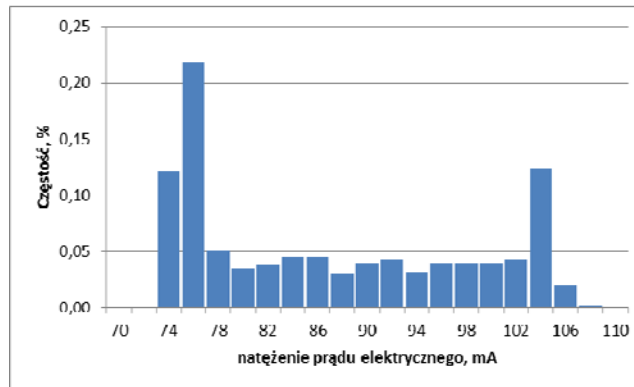
Najwyższy poziom zanieczyszczeń PM2.5 zarejestrowano 26 kwietnia w lokalizacji nr. 3 i wynosił $22,73 \mu\text{g}/\text{m}^3$, natomiast najniższy 29 kwietnia również w lokalizacji nr. 3 i wynosił $6,68 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Jeżeli wziąć pod uwagę średnią wartość z 5 kolejnych dni wyników pomiarów to można zaobserwować, że najwyższy poziom zanieczyszczeń PM2.5 odnotowano w lokalizacji 4 na terenie Kampusu Politechniki Lubelskiej a najniższy w lokalizacji 1.

Przeprowadzono test maksymalnego czasu trwania pojedynczego cyklu pomiarowego oraz pomiar zużycia

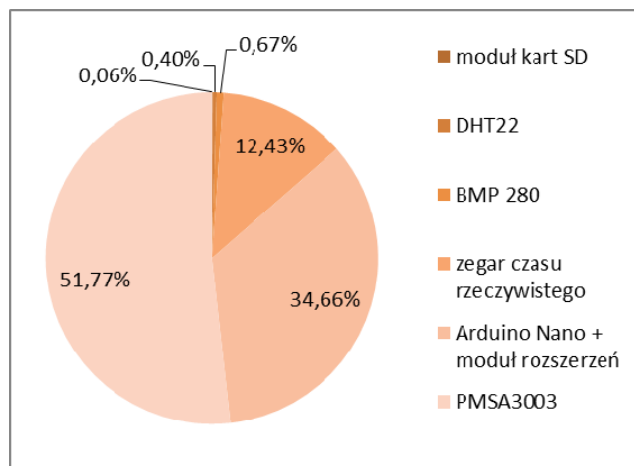
energii elektrycznej przez system pomiarowy. Wyniki przedstawiono poniżej:

Tabela 10. Test maksymalnego czasu trwania pojedynczej sesji pomiarowej, M – średnia wartość

nr. testu	maksymalny czas sesji pomiarowej	liczba pomiarów	czas pomiędzy pomiarami
-	s	-	s
1	14918	6300	2,368
2	18207	7679	2,371
3	14271	6018	2,371
M	15798,7	6665,7	2,370



Rys. 6. Histogram natężenia prądu elektrycznego pobieranego przez system pomiarowy, w trakcie 20 minut pracy systemu.



Rys. 7. Procentowy rozkład natężenia prądu elektrycznego pobieranego przed poszczególne podzespoły systemu pomiarowego.

Układ pomiarowy pobiera minimalnie 0,074 A, maksymalnie 0,108 A. W stanie oczekiwania na dane pomiarowe układ pobiera prąd elektryczny o natężeniu w zakresie 0,074-0,078 A. Ponad 50% prądu elektrycznego wymagane jest do zasilania modułu PMSA3003. Możliwa jest optymalizacja zużycia energii poprzez wylutowanie diód LED. W całym systemie są 4 diody LED, które pełnią rolę jedynie sygnalizacyjną poprawności zasilania. Jak oszacowano wylutowanie wspomnianych diód obniżyło by natężenie prądu elektrycznego o 0,012 A, co przekłada się na 15,38% całkowitego natężenie prądu. Istnieją jeszcze inne metody na obniżenie zużycia energii takie jak obniżenie taktowania zegara w module Arduino Nano czy przełączenie wspomnianego modułu w tryb uśpiętej pracy [17].

Średnie natężenia prądu pobieranego wyniosło: 0,084 A, odchylenie standardowe natężenia prądu: 0,015 A, minimum: 0,068 A. Napięcie na zaciskach baterii: 12,54 V. Zatem średnia wartość mocy pobieranej wyniosła: 1,057 W. Średnio jeden cykl pomiaru jakości powietrza przez system, trwający 2,370 s, wymaga około 0,003 Ws. Zużycie energii elektrycznej dla jednego cyklu ładowania: 1,057 W x 4,389 h = 4,638 Wh.

Wyniki pomiarów zestawiono z wartościami zarejestrowanymi przez lokalną stację pomiarową jakości powietrza GIOŚ zlokalizowaną około 3 km od Kampusu Politechniki Lubelskiej. Kod międzynarodowy stacji: PL0507A. Dane pochodzą z banku danych pomiarowych [18] zostały zestawione z wynikami układu pomiarowego dla tej samej chwili czasowej tzn. dla wartości z średnich z godziny 13:00 i 14:00.

Tabela 11. Zestawienie wyników pomiaru zanieczyszczeń PM2.5 i PM10, lokalnej stacji pomiarowej GIOŚ i badanego systemu pomiarowego.

Data	Stacja pomiarowa GIOŚ		Badany system pomiarowy	
	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10
25.04	12,0	17,1	10,92	12,36
26.04	15,0	18,7	18,53	19,63
27.04	11,5	15,5	15,90	17,28
28.04	8,7	18,0	10,98	12,83
29.04	8,5	15,8	7,32	8,37

Podsumowanie

Przedstawiony system pomiarowy umożliwia pomiar i rejestrację wartości 6-ciu wielkości w tym: PM1.0, PM2.5, PM10, temperatury, ciśnienia i wilgotności. Przyjęta modułowa konstrukcja daje możliwość zwiększenia liczby mierzonych wielkości, poprzez dołączenie kolejnego czujnika do magistrali I2C lub SPI oraz wykonanie stosownego rozszerzenia programu. Prezentowany system wykorzystuje 80% pamięci modułu Arduino Nano.

Konstrukcja montażowa systemu pomiarowego została zaprojektowana a następnie wykonana w technologii druku 3D. Korzystną cechą tej konstrukcji jest otwarta przestrzeń dla swobodnego przepływu powietrza. Relatywnie mała masa systemu i autonomiczne zasilanie sprzyjają szerokim zastosowaniom, między innymi w bezzałogowych stacjach pomiarowych. Konstrukcja montażowa posiada dedykowany uchwyt do montażu w bezzałogowych stacjach pomiarowych.

Na podstawie dokonanych pomiarów pomiędzy 25 a 29 kwietnia 2022 r., w godzinach 13:00-14:00, indeks jakości powietrza (wg klasyfikacji GIOŚ) był na poziomie:

- dla PM10: bardzo dobry,
- dla PM2.5: dobry w 26 i 27 kwietnia oraz bardzo dobry 25, 28 i 29 kwietnia.

Relatywnie niski koszt systemu pomiarowego umożliwia, w przekonaniu autora, budowę sieci niskobudżetowych stacji pomiarowych monitorujących jakość powietrza, które mogą znaleźć zastosowanie, między innymi w inteligentnych systemach zarządzania budynkami.

Autor: mgr inż. Jarosław Tatarczak, Politechnika Lubelska, Katedra Automatyki i Metrologii, ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin, E-mail: j.tatarczak@pollub.pl;

LITERATURA

- [1] World Bank, The Global Health Cost of Ambient PM2.5 Air Pollution, *World Bank*, 2020
- [2] Sharma S., Chandra M., Kota, S. H., Health effects associated with PM2.5: a systematic review, *Current Pollution Reports*, 6 (2020), 345-367
- [3] Slama A., i inni, Impact of air pollution on hospital admissions with a focus on respiratory diseases: a time-series multi-city analysis, *Environmental Science and Pollution Research*, 26 (2019), 16998-17009
- [4] Maciejewska K., Short-term impact of PM2.5, PM10, and PMc on mortality and morbidity in the agglomeration of Warsaw, Poland, *Air Quality, Atmosphere & Health*, 13 (2020), 659-672
- [5] Strona Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska, wykaz indeksów jakości powietrza strona: https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/content/health_informations, ostatni dostęp: maj 2022
- [6] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 czerwca 2018 r. w sprawie zakresu i sposobu przekazywania informacji dotyczących zanieczyszczenia powietrza, *Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej*, Warszawa 2018
- [7] Strategiczny program państwowego monitoringu środowiska na lata 2020-2025, GIOŚ, Warszawa 2020
- [8] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/50/WE z dnia 21 maja 2008 r. w sprawie jakości powietrza i czystszej powietrza dla Europy, *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej*, 2008
- [9] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 13 września 2012 r. w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu, *Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej*, Warszawa 2012
- [10] Frączkowski T., Monitoring pyłu zawieszonego w atmosferze. Cz. 1, Metody pomiaru stężenia pyłu zawieszonego, *LAB Laboratoria, Aparatura, Badania*, 22 (2017) nr 2, 32--36
- [11] Norma: PN-EN 14907, Jakość powietrza atmosferycznego - Standardowa grawimetryczna metoda oznaczania frakcji masowej PM2,5 pyłu zawieszonego, PKN, 2006
- [12] PN-EN 12341 Jakość powietrza -- Oznaczanie frakcji PM10 pyłu zawieszonego -- Metoda odniesienia i procedura badania terenowego do wykazania równoważności stosowanej metody pomiarowej z metodą odniesienia, PKN, 2006
- [13] Hergert W.; Wriedt T., *The Mie theory: basics and applications*, Springer, (2012)
- [14] Jovašević-Stojanović M, Bartonova A, Topalović D, Lazović I, Pokrić B, Ristovski Z. On the use of small and cheaper sensors and devices for indicative citizen-based monitoring of respirable particulate matter, *Environ Pollut.* 206 (2015);:696-704
- [15] Brigida A., Barretta L., Giudice A., i inni, A Review of Low-Cost Particulate Matter Sensors from the Developers' Perspectives, *Sensors* 20 (2020), no. 23, 6819
- [16] Giordano M. R., Malings C., Pandis S. N., i inni, From low-cost sensors to high-quality data: A summary of challenges and best practices for effectively calibrating low-cost particulate matter mass sensors, *Journal of Aerosol Science*, 158 (2021)
- [17] SEBASTIAN, S., A Survey about Power Consumption for Arduino. *Carpathian Journal of Electrical Engineering*, 14 (2020) nr 1, 105–109
- [18] Bank danych pomiarowych z stacji Lublin, ul. Obywatelska 13, link: https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/current/station_details/archive/266, ostatni dostęp: maj 2022