

Michał GOJTOWSKI*, Paweł IDZIAK**

NISKOBUĐETOWY INTELIGENTNY OCZYSZCZACZ POWIETRZA PRZEZNACZONY DLA NIEWIELKICH POMIESZCZEŃ UŻYTECZNOŚCI PUBLICZNEJ

W artykule przedstawiono koncepcję oraz zrealizowany, funkcjonalny model fizyczny mobilnego oczyszczacza powietrza przeznaczonego dla niedużych pomieszczeń użyteczności publicznej lub mieszkań. Oczyszczacz jest konstrukcją zwartą, sterowaną mikrokontrolerem serii Arduino UNO. Model wyposażony jest w zestaw sensorów pozwalających określić zawartość zanieczyszczeń typu PM_{2,5} i PM₁₀. Po przekroczeniu przyjętego, w oprogramowaniu progu, układ automatycznie rozpoczyna proces filtrowania powietrza. Pomiarowi podlegają: zawartość zanieczyszczeń stałych, wilgotność i temperatura powietrza oraz spadek ciśnienia na wbudowanych filtrach. Oczyszczacz pochłania zarówno zanieczyszczenia stałe jak też redukuje zanieczyszczenia lotne organiczne. Układ został wyposażony w ekran informujący użytkownika o parametrach powietrza i stanie zanieczyszczenia filtra typu HEPA.

SŁOWA KLUCZOWE: zanieczyszczenie powietrza, filtry typu HEPA, Arduino, sensory parametrów powietrza.

1. WPROWADZENIE

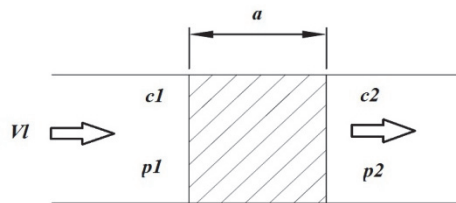
Powszechne zanieczyszczenie powietrza w wielkich miastach coraz częściej w istotny sposób utrudnia życie ich mieszkańcom. Stosowane dotychczas systemy wentylacji pomieszczeń, szczególnie w wielorodzinnych budynkach mieszkalnych i w budynkach użyteczności publicznej, eksploatowanych od co najmniej 5-6 lat, korzystające w procesie wymiany powietrza z powietrza z zewnątrz nie posiadają odpowiedniego mechanizmu monitorowania i oczyszczania wprowadzanego do budynku powietrza. Ideą motywującą do zajęcia się tym problemem jest zamysł zapewnienia użytkownikom, wspomnianych obiektów budowlanych, dostępu do powietrza pozbawionego mechanicznych oraz chemicznych zanieczyszczeń, negatywnie wpływających na zdrowie człowieka.

* Politechnika Warszawska

** Politechnika Poznańska

Organizm ludzki jest przystosowany do wychwytywania pyłów ze skutecznością nawet do 93% jeśli średnica cząstki stałej unoszącej się we wdychanym powietrzu wynosi około 12 μm [1, 2]. I tak odpowiednio pyły o średnicach powyżej 10 μm są zatrzymywane przez błonę śluzową gardła i krtani, drobinę o średnicy około 5 μm - przez krtani, nieco mniejsze (do 4,2 μm) przez tchawicę i oskrzela, a w oskrzelikach i pęcherzykach płucnych zostają zatrzymane cząsteczki o średnicy około 1 μm [3]. Oznacza to, że drobniejsze elementy dostają się do organizmu człowieka, a te odfiltrowane i odłożone we wspomnianych narządach stopniowo obniżają zdolność ludzkiego organizmu do odpowiedniej wymiany gazowej. Zdolności samooczyszczania organizmu są ograniczone, zatem filtracja powietrza w układach wentylacji powoli staje się koniecznością.

Filtry powietrza opisuje się wieloma parametrami pozwala to na dobór odpowiedniego podzespołu separującego do konkretnej aplikacji. Zasadność stosowania danych właściwości wyjaśnia schemat ideowy filtra, zaprezentowany na rysunku poniżej.



Rys. 1. Schemat ideowy filtra

Wielkości opisujące filtr to przede wszystkim:

- c_1, c_2 – stężenie pyłu zawartego w powietrzu odpowiednio przed i za filtrem, najczęściej przedstawiane w [ziarna/m³] lub [mg/m³],
- p_1, p_2 – ciśnienie przed oraz za filtrem [Pa],
- v_L - prędkość powietrza wpływającego do układu filtrującego [m/s],
- V_S - pojemność złoża filtra [g/m²].
- Na podstawie powyższych wielkości, określone są parametry filtrów [2]:
- skuteczność wychwytywania cząstek $\varepsilon = \frac{c_1 - c_2}{c_1} \cdot 100\%$,
- stopień przepuszczalności $D = \frac{c_2}{c_1}$ oraz liczba dekontaminacji $Z_D = \frac{1}{D}$,
- spadek ciśnienia $\Delta p = p_1 - p_2$ będący wskaźnikiem zużycia filtra (im spadek ciśnienia Δp większy tym większe zużycie filtra; związane to jest ze zjawiskiem intercepcji ziaren pyłu w przestrzeni osadczą,

- czas pracy filtra, aż do jego zużycia: $S = \frac{V_s}{3,6 \cdot v_f \cdot c_l \cdot \varepsilon}$; jest to czas od rozpoczęcia eksploatacji aż do granicznej wartości spadku ciśnienia na filtrze lub do przebicia warstwy filtrującej przez przepływające medium.

2. UKŁADY FILTRUJĄCE

Zanieczyszczenia powietrza to zarówno zanieczyszczenia mechaniczne (pyły) jak też gazy i lotne związki chemiczne o złożonym oddziaływaniu na ludzki organizm. Oznacza to, że układy filtrujące powinny zapewniać separację mechaniczną oraz wykazywać zdolność do wychwytywania lub neutralizowania niepożądanych związków chemicznych. Filtry, lub w ogólnym przypadku metody oczyszczania powietrza, można sklasyfikować ze względu na sposób eliminacji niechcianych wtrąceń na filtry: mechaniczne, chemiczne, jonizacyjne, termodynamiczne, fotokatalityczne i wodne. Największe znaczenie w rozpatrywanych aplikacjach mają dwa pierwsze typy filtrów.

Filtracja elektrostatyczna (jonizacyjna) polega na jonizowaniu oczyszczanego powietrza, co powoduje dodatnie naładowanie się wszelkich cząstek stałych. Naładowane cząstki przyciągane są przez elektrodę o ujemnym potencjale. Czyszczenie tego rodzaju filtra sprowadza się do czyszczenia elektrody wychwytywającej. Układy jonizujące oczyszczane powietrze mają relatywnie wysoką skuteczność wychwytywania cząstek stałych (do 97% dla zanieczyszczeń o średnicy 1µm) [3]. Główną wadą tych systemów jest produkt uboczny w postaci ozonu. Gaz ten jest szkodliwy dla zdrowia. Powoduje on podrażnienia błon biologicznych oraz negatywnie wpływa na działanie organizmu na poziomie komórkowym. Filtry jonizacyjne stosowane są głównie przy filtracji powietrza zanieczyszczonego mgłą olejową, emitowanego z kominów fabryk i innych zastosowaniach przemysłowych.

Filtry termodynamiczne to układy, które pozwalają wytrącić z powietrza mikroorganizmy takie jak roztocza, bakterie i wirusy. Zasada działania filtra termodynamicznego opiera się na podgrzaniu elementów wewnętrznych filtra do temperatury ok. 200°C. Wszelkie organizmy i zanieczyszczenia biologiczne ulegają "wypaleniu". W kolejnym etapie filtracji termodynamicznej powietrze wprowadza się do komory schładzającej je do temperatury otoczenia. Główną wadą tej metody jest duża energochłonność oraz niska skuteczność wychwytywania zanieczyszczeń nieorganicznych m.in. PM_{2,5} oraz PM₁₀ (zanieczyszczenia o średnicy 2,5 i odpowiednio 10 µm).

W filtrach fotokatalitycznych wykorzystuje się reakcje redoks (chemiczne reakcje utleniania zanieczyszczeń). Urządzenia tego typu wyposażone są w substancje katalizujące reakcje utleniania (np. aniony rodnika ponadtlenkowego). Dodatkowo filtry fotokatalityczne wyposażone są w lampy UV, które wspomagają proces utleniania. Układy tego typu stosowane są do usuwania lotnych

związków organicznych oraz niebezpiecznych gazów i sprowadzanie ich do bezpiecznego CO₂ oraz wody. Wadą tego rodzaju filtrów jest niecałkowite prze-reagowanie bardziej złożonych związków chemicznych, a w konsekwencji wy-produkowanie większego stężenia szkodliwych substancji niż znajdowało się na wlocie filtra. Dodatkową wadą jest również ozon [1, 3].

Ostatnia z wymienionych metod filtracji (filtry wodne) wykorzystuje lepkość cieczy (wody) w celu wychwytywania i magazynowania zanieczyszczeń stałych w powietrzu. Złożem filtra jest ciecz wypełniająca jego zasobnik. W przypadku nadmiernego zanieczyszczenia medium absorbującego należy je po prostu wymienić. Niedogodnością tego typu filtrów jest zwiększona zawartość pary wodnej w odfiltrowanym powietrzu.

W systemach oczyszczania powietrza najpopularniejsze są filtry mechaniczne, a szczególnie filtry o podwyższonej lub wysokiej efektywności separowania zanieczyszczeń stałych. Należą do nich filtry typu HEPA (ang. High Efficiency Particulate Air Filter). Są to filtry mechaniczne zbudowane z warstw materiału wykonanego z drobnego włókna szklanego. Średnica poszczególnych włókien bywa mniejsza od 0,1 μm. Najczęściej filtry takie spotyka się w postaci poskładanej w specjalne bloki, o kształcie prostokątnym lub okrągłym, włókniny. Sposób upakowania ma za zadanie zwiększyć powierzchnię filtrującą, a co za tym idzie zwiększyć pojemność złoża. W polskiej nomenklaturze filtry HEPA określa się mianem wysokoskutecznych ze względu na ich wysoką skuteczność ϵ wychwytywania cząstek o średnicy nie większej niż 0,3 μm. Klasyfikacja tego rodzaju filtrów objęta jest normą PN EN 1822:2009. Wyróżnia się dwie klasy filtrów HEPA: H13 oraz H14. Wszelkie wartości procentowe skuteczności filtracji wyliczane są w przywołanej normie, przy założeniu wychwytywania cząstek o średnicy 0,3 μm (tab. 1) [3, 4].

Tabela 1. Klasyfikacja filtrów powietrza zgodnie z PN EN 1822:2009.

Grupa filtrów	Klasa filtru	Wartość całkowita		Wartość miejscowa	
		Skuteczność[%]	Penetracja[%]	Skuteczność[%]	Penetracja[%]
EPA	E10	85	15	–	–
	E11	95	5	–	–
	E12	99,5	0,5	–	–
HEPA	H13	99,95	0,05	99,75	0,25
	H14	99,995	0,005	99,975	0,025
ULPA	U15	99,9995	0,0005	99,9975	0,0025
	U16	99,99995	0,00005	99,99975	0,00025
	U17	99,999995	0,000005	99,9999	0,0001

W powietrzu występującym w przeciętnym pomieszczeniu mieszkalnym lub biurowym znajduje się wiele zanieczyszczeń, które mogą być usunięte za pomo-

ca łą filtra wysokoskutecznego. Są to m.in. kurz, sierść zwierząt, pyłki roślin, zarodniki pleśni i grzybów a także bakterie i wirusy.

Według Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) najbardziej negatywny wpływ na ludzkie zdrowie mają pyły PM_{2,5} oraz PM₁₀ tj. cząstki o średnicy nie większej niż odpowiednio 2,5 oraz 10 μm. W roku 2005 WHO ustaliło iż stężenie PM_{2,5} nie powinno przekraczać 25 μg/m³ w ekspozycji dziennej, a stężenie PM₁₀ odpowiednio 50 μg/m³. Filtry HEPA pozwalają niemalże całkowicie wyeliminować niebezpieczne dla człowieka cząstki, a zatem powietrze przez nie przefiltrowane spełnia warunki określone przez WHO [1, 4].

Filtry HEPA znajdują zastosowanie w układach wentylacyjnych pomieszczeń o klasie czystości ISO 6 oraz ISO 5. Dodatkowo stosowane są w szpitalach w salach wymagających szczególnej troski o czystość powietrza. Stosowane są także w urządzeniach AGD (odkurzacze wysokiej klasy oraz oczyszczacze powietrza dla alergików).

Główną zaletą filtrów mechanicznych jest prosta technologia działania pozwalająca na bardzo dokładne usunięcie wszelkiego rodzaju cząstek stałych. Wadą tego sposobu oczyszczania powietrza jest ograniczona pojemność złoża filtra przez co konieczna jest ich wymiana. Problem częstego wymieniania filtrów rozwiązuje się przez stosowanie kaskadowych układów filtracyjnych z zastosowaniem filtra wstępnego.

Główną metodą usuwania z powietrza tzw. lotnych związków organicznych (LZO) jest zastosowanie filtra węglowego. W odróżnieniu od filtrów wysokoskutecznych LZO jest wychwytywane z powietrza poprzez wiązanie zanieczyszczających powietrze gazów z powierzchnią węgla aktywnego. Budowa filtrów węglowych w technologii oczyszczania powietrza jest podobna do budowy filtrów mechanicznych. Wnętrze filtra, wykonane z włókniny szklanej, obsypywane jest pyłem z węgla aktywnego. Istotne jest odpowiednie nasycenie węglem złoża. Z uwagi na chemiczną podstawę działania filtrów węglowych zanieczyszczone powietrze musi mieć kontakt z materiałem chłonnym przez odpowiednio długi czas. Dlatego prędkość przepływu powietrza v_L powinna wynosić ok. 0,9 cm/s [1, 2].

Zbyt duża prędkość przepływu może doprowadzić do spadku skuteczności układu. Kluczową kwestią przy stosowaniu filtrów węglowych jest temperatura otoczenia. Przekroczenie 45°C powoduje desorpcję związanych wewnątrz zanieczyszczeń czyli uwolnienie ich do pomieszczenia oczyszczanego. Czas pracy filtra jest ograniczony, zależny głównie od ilości równomiernie rozproszonego pyłu węglowego. Po upływie okresu eksploatacji konieczna jest wymiana kasety filtrującej lub uzdatnienie poprzez wyczyszczenie oraz zasypanie aktywowanym węglem. Aby wydłużyć czas pracy filtra możliwe jest stosowanie układu kaskadowego. Zestawy takie często składają się z zespołu filtrów mechanicznych wraz układem z węglem aktywnym.

3. KONCEPCJA MOBILNEGO OCZYSZCZACZA POWIETRZA

Konceptcja zakłada funkcjonowanie sprawnego oraz wydajnego systemu wentylacyjnego dostarczającego świeże powietrze z zewnątrz (tj. o możliwie niskiej zawartości CO₂), oraz o **nieznanym** zapyleniu. Proces poprawy jakości powietrza polegać będzie na reaktywnym oczyszczaniu powietrza przez urządzenie w przypadku wykrycia nieprawidłowego stężenia jednego z wykrywanych zanieczyszczeń.

Pyły zawieszone tj. cząstki stałe o rozmiarach rzędu 1µm lub mniejszych są jednymi z bardziej szkodliwych zanieczyszczeń powietrza. Cząstki o rozmiarach rzędu dziesiątych części µm nie są bowiem filtrowane przez górne drogi oddechowe człowieka. W powietrzu cząstki stałe powstają najczęściej jako produkty niepełnego spalania węgla lub jako produkty spalania oleju napędowego w silnikach wysokoprężnych. Współczesne miasta są przepełnione źródłami pyłów zawieszonych i konieczną staje się kontrola stężenia występowania tych związków w powietrzu zasilającym układy wentylacyjne pomieszczeń użyteczności publicznej [4].

W założeniach projektowych przyjęto, że budowane urządzenie będzie mobilne o zdolnościach do poprawy stanu powietrza w pomieszczeniach o kubaturze około 130 m³ i powierzchni użytkowej ok. 40-50 m² poprzez redukcję zanieczyszczeń stałych.

Założono że:

- urządzenie składać się będzie z 3 głównych zespołów funkcyjnych tj. układu pomiarowo-sterującego, układu filtrującego oraz konstrukcji nośnej,
- układ sensoryczny powinien monitorować zapylenie powietrza, temperaturę, wilgotność względną oraz spadek ciśnienia na filtrach urządzenia; załączanie układu powinno zachodzić automatycznie,
- informacje o stanie powietrza, temperaturze oraz wilgotności powinny być przekazywane użytkownikowi np. poprzez wyświetlacz LCD,
- układ filtrujący ma wychwytywać cząstki PM10 i PM2,5 ze skutecznością min. 95% a zastosowany wentylator zapewniać przepływ min. 100 m³/h,
- ze względu na aspekty ekonomiczne założono, iż dokładność stosowanego sensora pozwoli jedynie na orientacyjne pomiary, dlatego konieczne będzie zastosowanie dodatkowego przycisku załączającego układ filtrujący niezależnie od wskazań czujnika,
- układ filtrujący powinien być monitorowany na wypadek zużycia; użytkownik urządzenia powinien być poinformowany o konieczności wymiany wkładów filtracyjnych np. odpowiednim komunikatem na wyświetlaczu.

Pierwotnie założono, że algorytm działania układu powinien uwzględniać sygnały z przetworników pomiarowych wykrywających stężenie: pyłów zawieszonych PM2,5 oraz PM10, formaldehydu, tlenku oraz dwutlenku węgla. Pozwoli to na wykrywanie zagrożeń, jednak ze względu na brak sprzężenia z sys-

temem wentylacji, układ nie będzie w stanie zmniejszyć stężenia CO oraz CO₂. Jego funkcja ograniczona byłaby do zaalarmowania przebywających wewnątrz pomieszczenia osób o nieprawidłowym składzie chemicznym powietrza. Urządzenie czyszczące byłoby wówczas konstrukcyjnie zbliżone do komercyjnych układów filtrująco-czyszczących.

Podczas realizacji projektu, ze względów ekonomicznych, zrezygnowano z sensorów pomiaru stężenia CO, CO₂, i formadehydu. Przyjęto, że układ czyszczący powinien być wyposażony w dwa podstawowe filtry tzn. filtr wysokoskuteczny HEPA oraz filtr mechaniczny nasycony węglem aktywnym. Ponadto wskazane jest zastosowanie dodatkowego filtra wstępnego w celu osiągnięcia dłuższego czasu pracy filtrów głównych.

Do projektowanego urządzenia dobrano filtr HEPA marki MeeTools dostępny jest jako wkład filtracyjny dla odkurzaczy przemysłowych.

Zgodnie z normą PN EN 1822-1:2009 filtr ten należy do klasy E12, więc właściwszym jest nazywanie go filtrem klasy EPA (filtr skuteczny). Charakteryzuje się on 99,5% skutecznością wychwytywania cząstek przy badaniu z wykorzystaniem syntetycznego pyłu o średnicy 0,4 μm. Zaproponowany filtr może usuwać alergeny w postaci pyłków roślin lub sierści zwierząt. Oczyszczacz wyposażony w ten filtr zmniejsza ilości drobnoustrojów w powietrzu takich jak roztocza, bakterie a nawet niektóre wirusy.

Czas eksploatacji filtra może się różnić w zależności od intensywności pracy oczyszczacza. Biorąc pod uwagę zalecenia producentów oczyszczaczy o podobnej konstrukcji można przypuszczać, że wkład filtracyjny powinien być zdalny do pracy przez minimum 2 lata. Projektowany oczyszczacz wyposażony został w układ mierzący zużycie filtra, co eliminuje obowiązek pamiętania o wymianie przez użytkownika.

Aby zapewnić użytkownikowi powietrze pozbawione zanieczyszczeń chemicznych (lotne związki organiczne LZO oraz formaldehyd) zastosowano dodatkową warstwę filtrującą w postaci filtra z węglem aktywnym. Jako filtr wybrano matę o grubości 5mm i gramaturze wynoszącej 240g/m². Według danych katalogowych producenta mata o tej gramaturze wykazuje ok. 20% nasycenia węglem aktywnym.

4. KONSTRUKCJA OCZYSZCZACZA

4.1 Układ sterowania

Jako układ sterowania wykorzystano płytkę rozwojową typu Arduino UNO, wyposażoną w mikroprocesor Atmega328F-PU. Zastosowanie gotowego sterownika pozwoliło na znaczące uproszczenie projektowanego obwodu drukowanego, a także skorzystanie z gotowych bibliotek programistycznych.

Program zaimplementowany do pamięci sterownika opracowany został w środowisku ArduinoIDE. W przypadku opisywanego projektu, konieczne było zaimportowanie dodatkowej biblioteki pozwalającej na obsługę wyświetlacza LCD oraz modułu do pomiaru temperatury. W programie wykorzystano dwie dodatkowe biblioteki *dht11.h* oraz *LiquidCrystal.h* przeznaczone odpowiednio dla sensora temperatury i wyświetlacza LCD [5, 6].

W pętli głównej programu wywoływane są kolejno trzy funkcje, z której każda odpowiada jednemu z zastosowanych sensorów. Następnie program zatrzymywany jest funkcją *delay* na okres 2 sekund po czym wykonywana jest kolejna pętla programu.

Funkcja *void dht11()* obsługuje czujnik temperatury i wilgotności. Wewnątrz funkcji wykonywana jest operacja zbierania danych z czujnika, wyświetlania ich na ekranie urządzenia oraz przesłanie sygnału w formie cyfrowej do komputera.

Zastosowana funkcja *void dustSensor()* pozwala na obsługę analogowego optycznego czujnika zapylenia. Zgodnie z dokumentacją czujnika, jego uruchomienie wymaga najpierw zapalenia diody IR na czas 0,28 msek. Dopiero potem wykonywany jest pomiar. Wykorzystując informacje z pomiaru stworzono warunek, w wyniku którego zmieniają się komunikaty na wyświetlaczu LCD oraz załącza się wentylator. Kolejną funkcją wykorzystaną w programie jest funkcja *void pressureSensor()* która pozwala na odczyt wartości analogowej z czujnika ciśnienia. Algorytm polega na przypisaniu wartości odczytanej z przetwornika analogowo-cyfrowego do zmiennej całkowitej. Następnie sprawdzany jest warunek, którego przekroczenie skutkuje wyświetleniem informacji na wyświetlaczu LCD.

W programie zaimplementowanym do sterownika urządzenia czyszczącego znajduje się również dodatkowe przerwanie od zdarzenia zewnętrznego. Kod ten obsługuje dodatkowy przycisk znajdujący się na panelu oczyszczacza, który pozwala użytkownikowi na ręczne uruchomienie wentylatora.

Optyczny czujnik zapylenia

Tryb automatyczny pracy oczyszczacza polega na załączaniu układu oczyszczającego w momencie wykrycia zanieczyszczeń. Przetwornik wykorzystuje zjawisko rozproszenia światła emitowanego przez diodę podczerwoną. Stopień rozproszenia światła wykrywany jest przez fotodetektor. W projekcie wykorzystano moduł pomiarowy z czujnikiem GP2Y1010AU0F. Wyjściowym sygnałem pomiarowym czujnika jest napięciowy sygnał analogowy. Zastosowany w projekcie sterownik Arduino Uno posiada sześciokanałowy przetwornik analogowo-cyfrowy. Pozwala to na odczyt orientacyjnego progu zapylenia [5, 6, 8].

W fazie testowania przetwornika zauważono iż sygnał napięciowy nie zachowuje stałego poziomu. Ze względu na sposób działania przetwornika analogowo-cyfrowego (wartość pomierzona jest przekazywana do pamięci mikrokontrolera jedynie w wybranej chwili czasowej) konieczne okazało się zastosowanie dodatkowego kondensatora. Ponadto sygnał wyjściowy modułu pomiarowego

został przez producenta podzielony jedenastokrotnie. Ten fakt należało uwzględnić podczas opracowywania programu sterującego pracą oczyszczacza.

Sensory temperatury i wilgotności

Układ pomiarowy wyposażono w moduł dostarczający informacji o temperaturze oraz wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniu. Zastosowano moduł pomiarowy DHT11. Pomiar temperatury realizowany jest poprzez układ rezystancyjny wyposażony w termistor typu NTC. Pomiar wilgotności odbywa się za pomocą sensora rezystancyjnego, który składa się z dwóch odizolowanych elektrod w kształcie grzebieni. Moduł zaprojektowany został do użytku w warunkach pokojowych i charakteryzuje się wąskimi zakresami pomiarowymi. Czujnik temperatury pracuje w zakresie 0-50°C, a czujnik wilgotności w zakresie (20-90)% RH (RH z ang. relative humidity – wilgotność względna) [7].

Układ jest przetwornikiem pomiarowym wyposażonym w mikrokontroler zbierający sygnały z czujników oraz obsługujący transmisję danych w formie cyfrowej. Komunikacja z modułem odbywa się poprzez transmisję szeregową typu „one-wire” czyli wykorzystującą tylko jedną linię sygnałową.

Sensor ciśnienia

Urządzenie czyszczące powietrze wyposażono w dwa filtry zasadnicze tj. mechaniczny filtr EPA oraz filtr węglowy. Oba te elementy ulegają zapychaniu przez wychwytywane przez siebie nieczystości. Powoduje to ograniczenie przepływu powietrza skutkujące spiętrzeniem oraz wzrostem ciśnienia przed układem filtrującym. Nadciśnienie pojawiające się przed filtrem może być mierzone oraz porównane z ciśnieniem atmosferycznym. Im większa różnica (czyli im większy spadek ciśnienia na układzie filtrującym) tym bardziej zanieczyszczony jest filtr. Pomiar spadku ciśnienia na filtrze zrealizowano za pomocą czujnika piezorezystancyjnego typu XCA505GN [9].

4.2. Układ wykonawczy

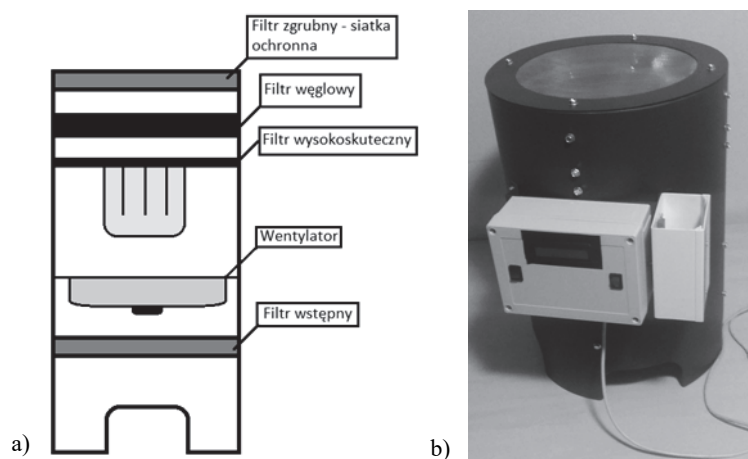
Zadaniem układu wykonawczego jest wytwarzanie strumienia powietrza, który przetłaczanego przez zestaw filtracyjny. W tym celu wykorzystano wentylator napędzany silnikiem BLDC (silnik bezszczotkowy z elektroniczną komutacją). Jest to wentylator firmy AAB Cooling o średnicy 250 mm, przeznaczony jest do chłodzenia komputerów typu PC. Moc wentylatora przy wynosi 3,2 W. Przy pracy z maksymalną mocą łopatkami wirnika osiągają prędkość 800rpm co generuje przepływ powietrza 232 m³/h.

4.3. Konstrukcja obudowy urządzenia

Przyjęto, że konstrukcja powinna zapewniać stabilność całego urządzenia, aby niemożliwe było przypadkowe przewrócenie filtra. Urządzenie przeznaczone jest do użytku domowego. Wkłady filtracyjne oczyszczacza są elementami ulega-

jącymi zużyciu na wskutek eksploatacji urządzenia, dlatego koniecznym jest, aby oczyszczacz miał możliwość łatwego demontażu i wymiany tych podzespołów. Rysunek 2 przedstawia szkic zbudowanego urządzenia oraz zdjęcie modelu.

Pierwszym elementem układu czyszczącego jest filtr wstępny, którego zadaniem jest wychwytywanie zanieczyszczeń o większych rozmiarach. Przechwytywanie tych zanieczyszczeń wydłuża czas pracy filtra wysokoskutecznego. Powyżej znajduje się wentylator wymuszający ruch powietrza w układzie. Kolejnym etapem jest właściwy zestaw filtrujący w postaci filtra wysokoskutecznego HEPA oraz filtra węglowego. Ostatnim elementem układu jest siatka zabezpieczająca układ przed przypadkowym zabrudzeniem lub uszkodzeniem przez użytkownika. Obudowę wykonano z rury PCV.



Rys. 2. Schemat rozmieszczenia elementów wewnątrz filtra (a) i zdjęcie modelu (b)

4.4. Kosztorys projektu

Koszty części składowych lub operacji wykonanych podczas wykonywania prototypu urządzenia zebrano w tabeli 3.

Tabela 3. Kosztorys wykonania urządzenia.

Element	Ilość	Cena brutto [zł]
1	2	3
Arduino UNO	1	92,00
Czujnik zapylenia GP2Y1010AU0F	1	52,90
Czujnik temperatury i wilgotności DHT11	1	11,50
Czujnik ciśnienia XCA505GN	1	167,85
Wyświetlacz LCD 16x2	1	13,90

Cd. tabeli 3

1	2	3
Wentylator AAB 250	1	51,90
Zasilacz 12V 500mA	1	16,90
Obwód drukowany PCB	1	35,00
Skrzynka uniwersalna ABS	1	61,00
Moskitiera aluminiowa	1	39,90
Filtr HEPA	1	25,99
Filtr węglowy	1	20,00
Rura PCV 315mm	0,45 m	36,00
Normalia mechaniczne		162,60
Normalia elektryczne	1 kp	67,20
SUMA		854,64

5. SPOSTRZEŻENIA I WNIOSKI

System oparty o reaktywne oczyszczanie powietrza za pomocą pojedynczych urządzeń montowanych w pomieszczeniach budynku proponowany jest mniejszym budynkom użyteczności publicznej takim jak urzędy pocztowe lub przychodnie lekarskie. Koszt pojedynczego urządzenia działającego w koncepcji rozproszonego systemu oczyszczania szacowany jest na 1000 zł. W tabeli 4 przedstawiono szacunki kosztów poszczególnych elementów w przypadku produkcji seryjnej.

Koszty eksploatacyjne systemu z niezależnymi urządzeniami czyszczącymi ograniczają się do wymiany wkładów filtrujących oraz do kosztów energii zużywaną przez urządzenia. Przewiduje się, że filtry powinny być wymieniane co 12-24 miesięcy. Dopuszczalny czas pracy układu filtrującego zależy od średniego stanu powietrza w budynku. Zużycie energii elektrycznej jest niewielkie. Prognozowana moc urządzeń wynosi około 50 W, co przy założeniu ceny za kWh w wysokości 0,75 zł/kWh oraz 8 godzinnego dnia pracy wynosi ok. 100 zł rocznie.

Zbudowane urządzenie pozwala na ciągłe monitorowanie stanu zapylenia powietrza oraz uruchomienie układu czyszczącego po przekroczeniu dopuszczalnego limitu zapylenia. Dla zbudowanego urządzenia określono je na poziomie $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Badania emisji hałasu prowadzone zgodnie z wymogami wielu aktów normatywnych np. normy PN-EN 60704-1:2010 wykazały, że poziom ciśnienia akustycznego emitowanego przez oczyszczacz powietrza, pomierzonego z zastosowaniem krzywej korekcyjnej A nie przekracza 31 dB [10].

Tabela 4. Szacowany koszt urządzenia czyszczącego.

Element	Szacowany koszt [zł]
Optyczny czujnik zapylenia	300,00
Czujnik formaldehydu	180,00
Czujnik dwutlenku węgla i tlenku węgla	250,00
Elektroniczny moduł sterujący	120,00
Moduł komunikacji ZigBee	60,00
Filtry	80,00
Wentylator	50,00
Wyświetlacze, obudowa, pozostałe elementy konstrukcji	150,00
SUMA	1190,00

LITERATURA

- [1] Ingo Nietzold, tłumaczenie Leon Kołodziejczyk „Filtracja powietrza”, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1984 r.
- [2] <https://aero7.pl>, (5 października 2018 r.).
- [3] Norma PN EN 1822:2009 Wysokoskuteczne filtry powietrza (HEPA i ULPA).
- [4] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego WE 1272/2008 (CLP).
- [5] <https://www.dfrobot.com>, (13 grudnia 2018 r.).
- [6] <https://www.systechillinois.com>, (16 grudnia 2018 r.).
- [7] Nota katalogowa czujnika DHT11.
- [8] Nota katalogowa czujnika GP2Y1010AU0F.
- [9] Nota katalogowa czujnika XCA505GN.
- [10] Norma PN-EN 60704-1:2010.

LOW-BUDGET INTELLIGENT AIR PURIFIER SUITABLE FOR SMALL PUBLIC SPACES

The article presents the concept and implemented, functional physical model of a mobile air purifier for small public spaces or apartments. The purifier is a compact, controlled microcontroller of the Arduino UNO series. The model is equipped with a set of sensors allowing to determine the content of PM2.5 contaminants and PM10. After exceeding the adopted threshold in the software, the system automatically starts the process of air filtering. The following factors are measured: solid contamination content, humidity and air temperature as well as pressure drop on built-in filters. The purifier absorbs both solid pollutants as well as reduces volatile organic pollutants. The system has been equipped with a screen informing the user about air parameters and the state of the HEPA filter contamination.

(Received: 25.02.2019, revised: 09.03.2019)