

Respiratory DIY

W czasie globalnego kryzysu, wywołanego pandemią koronawirusa, szpitale i placówki służby zdrowia zgłaszają niedobory niezbędnego sprzętu, który nie tylko zapewnia bezpieczeństwo pacjentom, ale także personelowi. Chodzi oczywiście o respiratory.

Pacjenci z COVID-19 mogą mieć trudności z oddychaniem, ponieważ wirus infekuje górne lub dolne części dróg oddechowych. W ciężkich przypadkach dochodzi do obrzęku oraz nagromadzenia płynu w oskrzelach, co prowadzi do niewydolności wymiany gazowej w pęcherzykach płucnych (małych przestrzeniach zawierających powietrze w płucach, które wymieniają tlen i dwutlenek węgla z krwią). W konsekwencji utrudnia to oddychanie.

Oddychanie jest absolutnym warunkiem dla życia, nie jest więc zaskakujące, że respiratory mechaniczne stosowane na oddziałach intensywnej terapii były poszukiwane w ciągu ostatnich kilku miesięcy. Urządzenia te zawierają (w dużym uproszczeniu) przenośną sprężarkę do wspomagania oddychania pacjenta poprzez przepychanie powietrza przez rurkę umieszczoną w tchawicy, celem rozszerzenia płuc.

Zapotrzebowanie na respiratory mechaniczne znacznie przewyższyło ich dostępną liczbę. To niewydolność szpitali, a nie sam koronawirus, przyczyniła się do tak dużej śmiertelności w wielu regionach świata.

Obecnie podejmuje się dużo wysiłków na rzecz rozwiązania problemu niedoboru respiratorów. Przykładem są firmy samochodowe, takie jak General Motors, które dostosowały istniejące projekty urządzeń wentylacyjnych i produkują je w swoich zakładach. Natomiast uznani producenci respiratorów zwiększyli swoją produkcję, jednocześnie udostępniając dokumentację niektórych projektów, aby inni mogli je odtworzyć.

Chociaż starania te mają na celu wyprodukowanie respiratorów, które są bliższe standardowemu sprzętowi medycznemu stosowanemu na oddziałach intensywnej terapii, to obserwuje się również dużo projektów urządzeń tymczasowych, które powstały w celu zwiększenia ilości dostępnego sprzętu w trudnych czasach, nawet jeżeli nie spełniają wszystkich wymaganych norm medycznych.

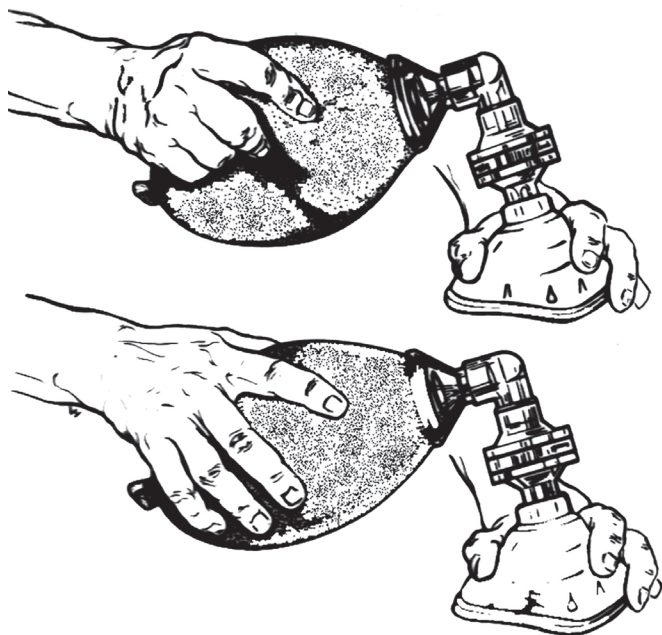
Zasada działania

Proste, niedrogie respiratory ratunkowe to głównie zautomatyzowana wersja ręcznych resuscytatorów, powszechnie znanych jako worki samorozprężne lub worki Ambu (od nazwy producenta, który jako pierwszy wprowadził je na rynek). Worki stosowane są do manualnej wentylacji płuc u pacjentów nieoddychających lub niewydajnie oddychających. Często mają możliwość podania dodatkowego tlenu. Przy wentylacji powietrzem atmosferycznym do płuc trafia mieszanka z 21% stężeniem tlenu. Można uzyskać stężenie od 45% do 85%, zależnie od prędkości przepływu gazu.

Zasada działania worka Ambu jest bardzo prosta. Po podłączeniu go do maski twarzowej lub rurki intubacyjnej operator (lekarz, pielęgniarka, ratownik medyczny) rytmicznie uciska worek, aby wtłaczać powietrze do płuc resuscytowanej osoby (**rysunek 1**). Tlenoterapia połączona z wentylacją mechaniczną ma na celu wspomaganie pacjentów w utrzymaniu odpowiedniego nasycenia krwi tętniczej tlenem (>88%).

Cykl mechanicznego wspomaganie oddychania składa się z czterech części:

- 1. Wdech**, w czasie którego zawór wydechowy respiratora jest zamknięty, a respirator wykorzystuje sprężone powietrze do spowodowania przepływu gazu do płuc;
- 2. Przełączenie**, podczas którego następuje zmiana z wdechu na wydech;



Rysunek 1. Sposób postępowania podczas resuscytacji oddechowej z użyciem worka samorozprężnego

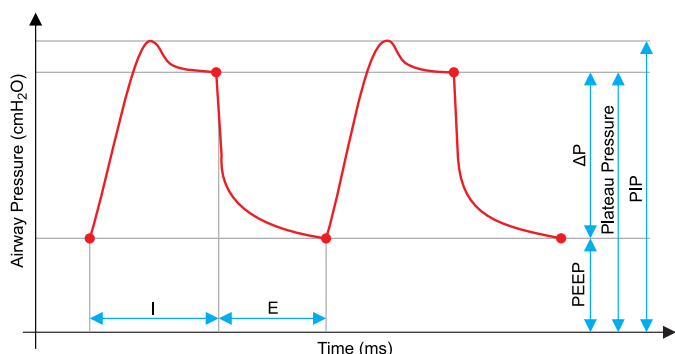
3. **Wydech**, w którym główny przepływ oddechowy zostaje przerwany, a zawór wydechowy otwarty, aby umożliwić ucieczkę gazu z płuc;
4. **Wyzwolenie**, w którym następuje przełączenie z powrotem z wydechu na wdech.

Generalnie respiratory są projektowane z uwzględnieniem kilku podstawowych parametrów oddychania, w tym:

- **objętość oddechowa** (objętość powietrza wchodzącego i wychodzącego z płuc przy każdym oddechu),
- **ciśnienie w drogach oddechowych**,
- **częstość oddechów**.

Kontrola ciśnienia w drogach oddechowych jest bardzo ważna, ponieważ nadmierna objętość powietrza wtłoczona do płuc lub nadmierne ciśnienie mogą rozciągać tkanki płuc, powodując ich uszkodzenie.

Istnieją cztery różne miary ciśnienia w drogach oddechowych podczas typowego cyklu wentylacji oddechowej (**rysunek 2**). Dodatkowo ciśnienie końcowo-wydechowe (PEEP) pomaga respiratorowi w utrzymaniu powietrza w płucach pod koniec oddechu, zapobiegając zapadaniu się pęcherzyków płucnych, a na wyższych poziomach poprawia wymianę gazów. Szczytowe ciśnienie wdechowe to maksymalne ciśnienie w drogach oddechowych podczas wdechu. Ciśnienie plateau reprezentuje ciśnienie w pęcherzykach płucnych w określonej fazie oddychania i jest często używane jako miernik



Rysunek 2. Cykl oddechowy respiratora, z zaznaczonymi kluczowymi parametrami ciśnienia: dodatnie ciśnienie końcowo-wydechowe (PEEP), ciśnienie sterujące (ΔP), szczytowe ciśnienie wdechowe (PIP) i ciśnienie plateau. Pokazane są również parametry czasowe wdechu (I) i wydechu (E)

do określenia maksymalnego ciśnienia, które można zastosować. Ciśnienie ΔP to plateau ciśnienia w drogach oddechowych minus PEEP. Można je również wyrazić jako stosunek objętości oddechowej do podatności układu oddechowego, wskazujący na zmniejszoną funkcjonalną wielkość płuc, obserwowaną u pacjentów.

Respiratory mechaniczne klasyfikuje się głównie wedle tego, który czynnik przerywa przepływ wdechowy. Stosowane są:

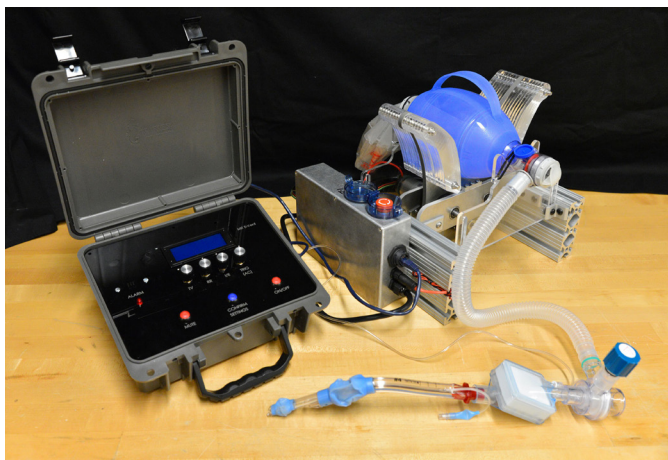
1. Respiratory z cyklizacją **ciśnienia** – przerywają przepływ, gdy ciśnienie w płucach osiąga ustalony próg;
2. Respiratory z cyklizacją **objętości** – zapewniają ustaloną objętość powietrza wtłaczaną do płuc, ale w ustawionym zakresie ciśnień (konfiguruje się maksymalne ciśnienie, aby uniknąć uszkodzenia płuc pacjenta);
3. Respiratory z cyklami **czasowymi** – regulują objętość oddechową poprzez ustawienie czasu wdechu i prędkości przepływu;
4. Respiratory z regulacją **przepływu** – przerywają wdech, gdy prędkość przepływu spada poniżej ustalonego progu.

Powszechne urządzenia komercyjne zapewniają regulację szeregu parametrów wentylacji mechanicznej, takich jak liczba oddechów na minutę (BPM), i są synchronizowane z rytmem oddechów pacjenta (SIMV) lub wymuszają dodatkowe oddechy (AC). Tryby te mogą być stosowane samodzielnie lub w połączeniu m.in. z utrzymaniem ciągłego, dodatniego ciśnienia w drogach oddechowych (CPAP). Tryb ten wykorzystuje zbiornik wysokiego ciśnienia i stały przepływ gazu, który przekracza potrzeby oddechowe pacjenta lub z pozytywnym ciśnieniem końcowo-wydechowym (PEEP). Ciśnienie resztkowe zwiększa się, co pozwala na aktywację pojemności resztkowej w płucach i aktywowanie o wiele większej ilości pęcherzyków płucnych oraz małych dróg oddechowych, które w przeciwnym razie by się zamknęły. Stosuje się też wentylację wspomaganą ciśnieniem (PSV), która reguluje ciśnienie w locie, gdy pacjent oddycha, aby utrzymać zaprogramowane ciśnienie wdechowe przez cały czas.

Awaryjne respiratory (tak klasyfikuje je m.in. amerykańskie FDA) nie muszą być wyposażone we wszystkie opisane powyżej funkcje. W większości przypadków skupiają się one tylko na jednym z trybów pracy. Jak już wspomniałem, urządzenia te wykorzystują worki samorozprężne do wymuszania oddychania, wraz z zestawem sensorów do pomiaru ciśnienia, albo nieskomplikowany system mechaniczny, do cyklicznego ściskania worka Ambu.



Fotografia 1. Ekonomiczny respirator bąbelkowy, przeznaczony do wentylacji dodatnim ciśnieniem noworodków i małych dzieci. System skierowany do krajów Trzeciego Świata itp

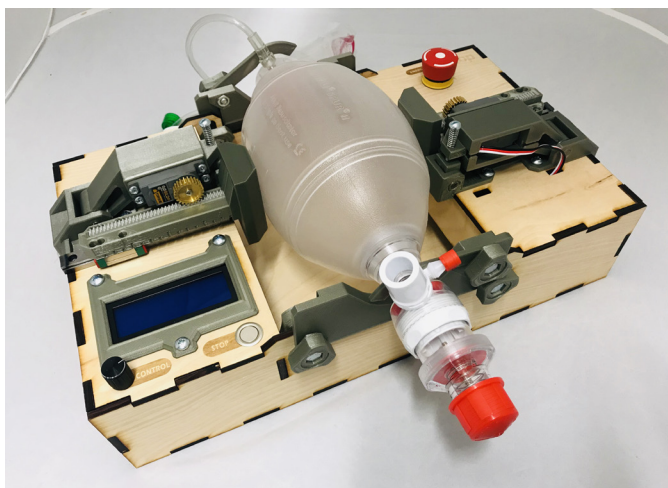


Fotografia 2. Otwarty projekt respiratora opracowanego przez MIT

Przegląd konstrukcji

Ostatnio powstało wiele projektów respiratorów o różnym mechanizmie działania oraz dostępnych na różnych zasadach. Część z nich, jak Pumani bubble CPAP czy D-box (**fotografia 1**), powstały jako ekonomiczne, ale komercyjne rozwiązania, a część, jak np. respirator z Massachusetts Institute of Technology (**fotografia 2**), to w pełni otwarte projekty.

Artykuł nie jest kompletnym przeglądem tego rodzaju konstrukcji. Jest ich zbyt wiele, aby zmieścić je na łamach naszego czasopi-
 sma, i cały czas powstają nowe projekty tego rodzaju. Nie będą też



Fotografia 3. Respirator awaryjny ApolloBVM



Fotografia 4. Respirator opracowany na University of Minnesota

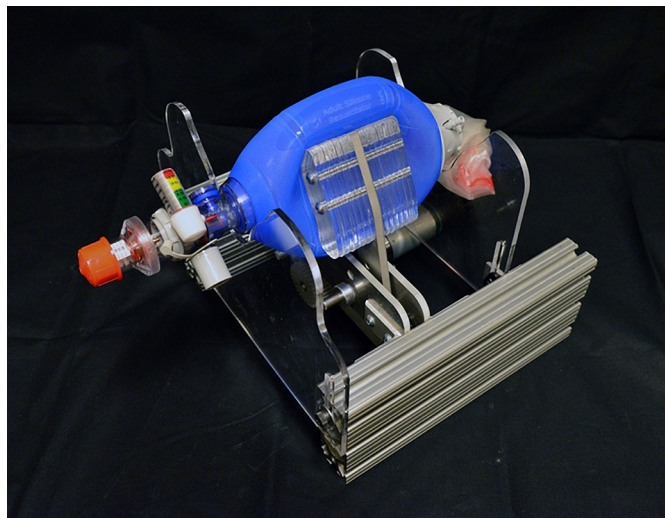
dokonywał analizy i oceny konstrukcji. Z jednej strony każda metoda, która pozwala ograniczyć rozprzestrzenianie się wirusa czy też zwiększa wydajność systemu opieki zdrowotnej, jest pożądana. Z drugiej strony, ocena działania tego rodzaju systemów powinna być pozostawiona specjalistom z tego zakresu – lekarzom.

Bardzo ciekawą i dobrze opisaną konstrukcją jest ApolloBVM, opracowany na Rice University. Na **fotografi 3** pokazano przykładowe wykonanie tego projektu. Jest to zautomatyzowany respirator z workiem samorozprężnym (BVM), zawierający gotowe komponenty w celu zapewnienia bezpiecznej i ciągłej wentylacji mechanicznej dla pacjentów z COVID-19. Konstrukcja jest dostępna na zasadzie otwartego źródła.

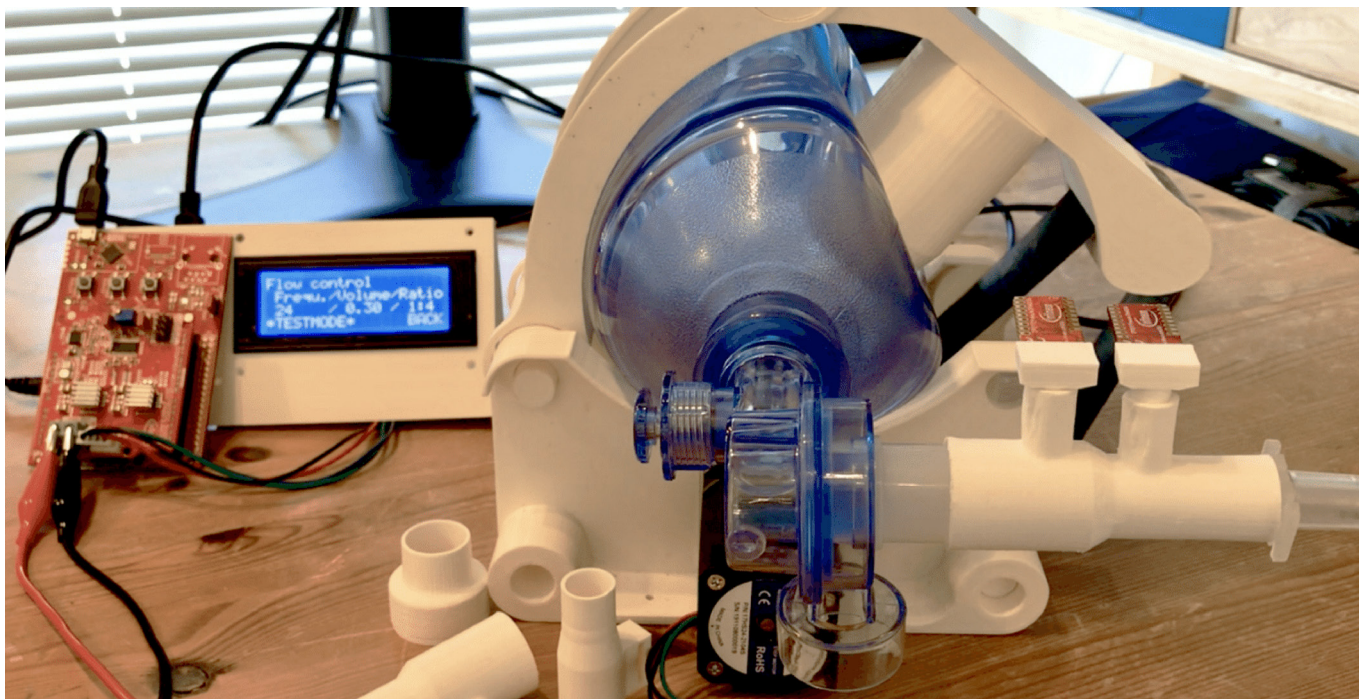
ApolloBVM to sterowane, zautomatyzowane rozwiązanie dodatkowe, które integruje się z szeroko dostępnymi workami Ambu. Urządzenie ściska BVM za pomocą układu mechanicznego, który jest w stanie zapewnić stałą i dokładną wentylację z nadciśnieniem (dodatknie PEEP – wyższe od atmosferycznego). W bieżącej wersji system pozwala na konfigurację objętości oddechowej w zakresie 300...650 ml (w krokach 50 ml), częstości oddechowej od 5...30 BPM (w krokach 1 BPM) oraz stosunku czasów I:E, równego 1:2, 1:3, 1:4 lub 1:5. Głównymi zaletami urządzenia są mały pobór prądu – około 15 W oraz niewielka cena wykonania, która szacowana jest na 250 dolarów. Dzięki zastosowaniu gotowych, dostępnych w typowych sklepach elementów oraz konstrukcji wycinanej z np. sklejki na ploterze laserowym i elementów z druku 3D, możliwe jest łatwe powielenie tej konstrukcji w krótkim czasie.

Na amerykańskich uczelniach powstał szereg podobnych konstrukcji tego rodzaju, które zostały jeszcze bardziej zoptymalizowane pod względem kosztów. Koszt wykonania minimalistycznego respiratora zaprojektowanego na University of Minnesota to zaledwie ok. 150 dolarów (**fotografia 4**), a koszt respiratora z MIT to ok. 100...200 dolarów (**fotografia 5**). Ta ostatnia konstrukcja wydaje się jednocześnie najbardziej dopracowana. Inżynierowie z MIT wykorzystali tam swoje wcześniejsze doświadczenia przy konstruowaniu respiratorów i bazowali na skonstruowanym w MIT, około 10 lat temu, ekonomicznym respiratorze, który zaprojektowali studenci w ramach zajęć z przedmiotu projektowanie urządzeń medycznych.

Otwarte projekty respiratorów powstają nie tylko na uczelniach, ale także w ramach hackathonów. Jest to skrótowa nazwa, jaką nadaje się tzw. maratonom projektowania, podczas których zespoły konkurują ze sobą, opracowując projekty o tej samej tematyce. W ramach tego rodzaju przedsięwzięcia jeden z zespołów zbudował OpenVent (**fotografia 6**), czyli kolejną konstrukcją korzystającą z worka samorozprężnego, która jest w stanie utrzymywać PEEP stale, na poziomie powyżej ciśnienia atmosferycznego. Koszt przy masowej produkcji



Fotografia 5. Respirator opracowany w Massachusetts Institute of Technology



Fotografia 6. Respirator OpenVent

(setek lub tysięcy sztuk) tego respiratora to około 135...270 dolarów, a więc porównywalnie z innymi konstrukcjami.

Podsumowanie

Otwarte projekty respiratorów zbudowane z użyciem worków samorozprężnych zostały opracowane i przetestowane na całym świecie (konstrukcje dostępne w Internecie pochodzą z USA, Wielkiej Brytanii, Izraela i nie tylko). Część z nich bazuje na starszych doświadczeniach projektantów ekonomicznych respiratorów, które np. dostarczano do krajów Trzeciego Świata jako pomoc humanitarną. Dzięki szerokiemu dostępowi do dokumentacji respiratorów i prostocie wykonania (użycie łatwo dostępnych elementów, platformy Arduino itp. oraz narzędzi produkcyjnych, takich jak niedrogie plotery laserowe czy drukarki 3D), istnieje możliwość szybkiej i taniej (od 100 dolarów za sztukę) produkcji tych urządzeń w odpowiedzi na nagłe zwiększenie zapotrzebowania spowodowane pandemią.

Pozostaje tylko mieć nadzieję, że masowa produkcja tego rodzaju urządzeń nie będzie nigdy w rzeczywistości potrzebna.

Nikodem Czechowski, EP

Źródła:

1. Joshua M. Pearce, „A review of open source ventilators for COVID-19 and future pandemics” [version 2; peer review: 3 approved]. F1000Research 9:218 (2020)
2. <http://bit.ly/38Wm205>
3. Jamie Ducharme, „Inventors Are Whipping Up Homemade Ventilators to Fend Off a Shortage. Some Doctors Are Wary”, „Time”, 6 kwietnia 2020
4. Ravinder Dahiya, Andrew Hart, „Why DIY Ventilators are Still a Vital Stopgap”, IEEE Spectrum, wrzesień 2020
5. ApolloBVM, <http://bit.ly/38Yd80>

REKLAMA

W kolejności lutowania:	
1	Zwora zamiast R4
2	R1 – 1kΩ (brąz-czarn-czerw-biły)
3	R2 – 1kΩ (brąz-czarn-czerw-biły)
4	R3 – 1kΩ (brąz-czarn-czerw-biły)
5	R5 – 1kΩ (brąz-czarn-czerw-biły)
6	D1 – 1N4148
7	D2 – 1N4148 lub podobny
8	Zwora 12
9	14-pin pod układ
10	100nF (niebieski) przy IC1
11	100nF (niebieski) przy IC2
12	100nF (niebieski) przy IC3
13	100nF (niebieski) przy IC4
14	100nF (niebieski) przy IC5
15	100nF (niebieski) przy IC6
16	22-pięc AFK-2
17	C1 – 100µF/25V II
18	D4 – 1N5822 I
19	T1 – BUZ10 (BUZ11, IRFS40, IRL3800, IRF240)
20	mały/lący jumper na kołki J1
21	Wzrosty do podstawki układu scalony CMOS

KITy AVT
@KITyAVT · Elektronika

<http://bit.ly/2BjVMN7>