ĆWICZENIE NR 8

APARATURA DO POMIARÓW WŁASNOŚCI UKŁADU ODDECHOWEGO

Cel ćwiczenia

Zapoznanie się z budową i działaniem urządzenia do badania własności mechanicznych układu oddechowego.

Część 8.1.

Zapoznanie się z możliwościami urządzenia do badania układu oddechowego

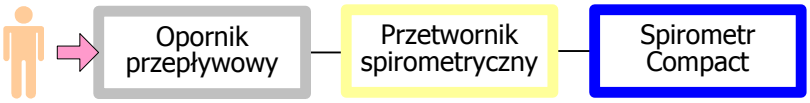
8.1.1. Zapoznanie się z budową i zasadą działania spirometru Vitalograph Compact II; identyfikacja schematu blokowego i algorytmu pracy urządzenia.
8.1.2. Jednopunktowa kalibracja spirometru za pomocą strzykawki.
8.1.3. Ocena możliwości korekcji warunków pomiarów (ATPS-BTPS) realizowanej przez urządzenie.
8.1.4. Identyfikacja norm spirometrycznych i możliwości ich egzekwowania w procedurach obliczeniowych.
8.1.5. Ocena znaczenia systemu ekspertowego zapiętego w algorytmie pracy urządzenia.
8.1.6. Ocena przydatność różnych formatów wydruku końcowego wyników badania.
8.1.7. Identyfikacja parametrów własnego układu oddechowego podczas próby natężonego wydechu. Porównanie uzyskanych rezultatów w świetle różnych norm spirometrycznych.
8.1.8. Określenie możliwości pomiarowych spirometru i zakresu zastosowań; ocena przydatności wybranego spirometru do badań screeningowych.

Rys. 1. Schemat układu pomiarowego do badania natężonego wydechu

Część 8.2.

Badanie wpływu oporów przepływowych przetwornika spirometrycznego na jakość oceny cech układu oddechowego

8.2.1. Pomiar wybranych parametrów własnego układu oddechowego, interpretacja uzyskanych rezultatów.
8.2.2. Sprawdzenie wpływu oporu przepływowego przetwornika spirometrycznego na rezultaty pomiarowe. Badania należy wykonać zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 2. Opory oddechowe modelować za pomocą różnych oporników przepływowych. Wyniki odnosić zawsze do tej samej normy.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego do badania natężonego wydechu podczas symulacji zwiększonych oporów oddechowych

Część 8.3.

Badanie znaczenia warunków powtarzalności i akceptowalności w pomiarach spirometrycznych

8.3.1. Ocena wymagań ATS-ERS dotyczących spełnienia warunków akceptowalności i powtarzalności podczas oceny układu oddechowego.

8.3.2. Praktyczna realizacja wymagań ATS-ERS. Odpowiednie badania przeprowadzić dla dwóch osób. Porównać wyniki dla każdej osoby oddzielnie następnie porównać końcowe rezultaty dwóch osób.

Aparatura

- spirometr COMPACT II
- strzykawka kalibracyjna (1 dm^3)
- rurki, stanowiące opory dodatkowe przepływu

Problemy

1. Podstawowe parametry sprawności układu oddechowego i metody ich pomiaru.
2. Fizyczne warunki pomiaru i ich wpływ na dokładność wyznaczania parametrów oddechowych.
3. Schemat blokowy spirometru, charakterystyka funkcji poszczególnych bloków. Parametry metrologiczne typowego spirometru.
4. Spirometr mikroprocesorowy. Zadania dla procesora. Struktura i możliwości urządzenia.
5. Źródła błędów pomiaru parametrów oddechowych.
6. Sposób sprawdzenia właściwości metrologicznych spirometru.
7. Komputeryzacja badań screeningowych.
8. Zmienność biologiczna pacjenta. Interpretacja wyników pomiarów zjawisk jednorazowych i rola norm medycznych.

Literatura

1. Bronzino J.D., The Biomedical engineering handbook, CRC Press, Boca Raton 2000.
2. http://oac.med.jhmi.edu/res_phys/DiseaseStates/DiseaseMenu.html
3. Nałęcz M. (red.): Biopomiary, Akad. Of. Wyd. EXIT, Warszawa 2001.
4. Stopczyk M.: Elektrodiagnostyka medyczna, PZWL Warszawa 1984.

Charakterystyka parametrów spirometrycznych

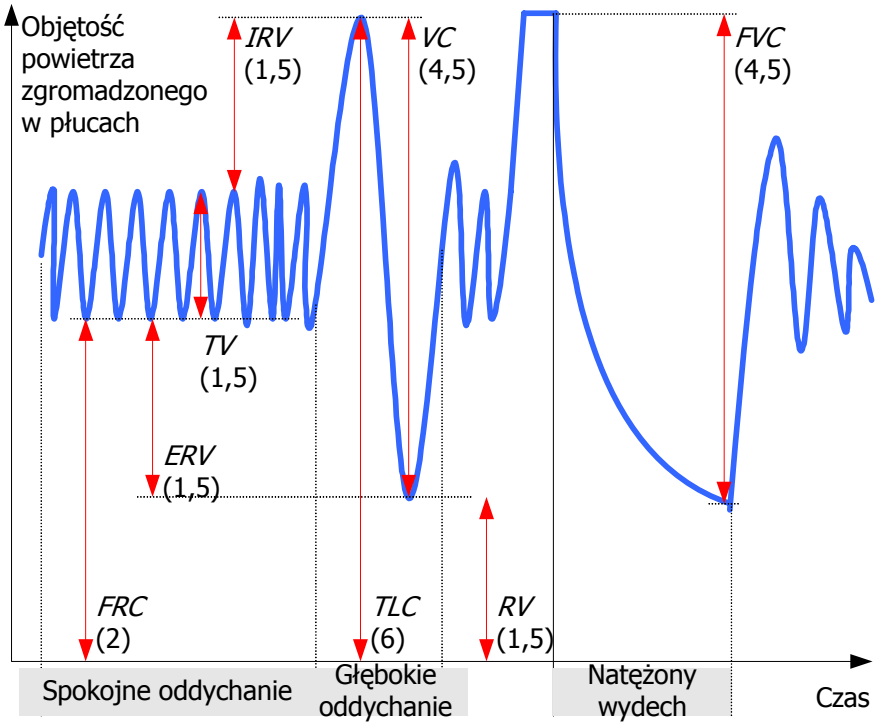
Jedną z metod diagnozowania układu oddechowego jest badanie spirometryczne, które polega na kontroli objętości wydychanego (lub wdychanego) powietrza i prędkości jego przepływu. Do najbardziej wartościowych diagnostycznie należy tzw. test natężonego wydechu. Polega on na tym, że pacjent nabiera do płuc maksymalną objętość powietrza, a następnie wydmuchuje go z największą siłą i szybkością, co zwykle trwa 4 do 6 sekund. Ważnym jest sposób, w jaki zmienia się objętość powietrza $V(t)$.

Na tej podstawie wyznacza się parametry oddechowe (spirometryczne) w postaci wartości objętości oraz chwilowej bądź średniej wartości prędkości przepływu powietrza. Wszystkie te parametry są miarą sprawności wentylacji płuc.

Warunki, w jakich znajduje się powietrze w płucach znacznie różnią się od warunków otoczenia, w których następuje pomiar: np. temperatura i wilgotność w płucach jest wyższa niż w otoczeniu (na zewnątrz). Z tego powodu wyniki pomiarów spirometrycznych koryguje się poprzez wprowadzenie odpowiednich współczynników przeliczeniowych tak, aby uzyskać znormalizowane (w sensie warunków fizycznych) wartości parametrów. Te dopiero można porównać z wartościami należnymi (czyli normami) dla danego pacjenta.

Tabela 1. Statyczne i dynamiczne parametry spirometryczne

Lp.	Skrót	Definicja	Wartość
		Parametry statyczne	
1.	*TV*	objętość oddechowa; *objętość powietrza wdychana (lub wydychana) przy jednym wdechu (lub wydechu)*	0,4 dm^3
2	*IRV*	zapasowa objętość wdechowa; *największa objętość powietrza, które może być wciągnięte do płuc poczynając od szczytu spokojnego wdechu*	3,6 dm^3
3	*ERV*	zapasowa objętość wydechowa; *największa objętość powietrza, które może być wydmuchane z płuc poczynając od szczytu spokojnego wydechu*	1,2 dm^3
5.	*VC*	pojemność życiowa; *maksymalna objętość powietrza, które może być wydmuchane z płuc po maksymalnym wdechu*	4,8 dm^3
7.	*FRC*	czynnościowa pojemność zalegająca; *objętość powietrza znajdującego się w płucach w chwili ukończenia spokojnego wydechu*	2,4 dm^3
8.	*RV*	objętość zalęgająca; *objętość powietrza pozostającego w płucach po maksymalnym wydechu*	1,2 dm^3
9.	*TLC*	całkowita pojemność płuc; *całkowita objętość powietrza znajdującego się w płucach w chwili ukończenia najgłębszego wdechu*	6,0 dm^3
		Parametry dynamiczne	
10.	*FVC*	natężona pojemność życiowa; *maksymalna objętość powietrza wydychanego z największą siłą i szybkością poprzedzonego maksymalnym wdechem*	4,5 dm^3
11.	FEV_t	natężona objętość wydechowa *t*-sekundowa; *objętość powietrza, które może być wydmuchane w czasie t liczonym od początku natężonego wydechu*	FEV_1 = (3,0 ÷ 4,0) dm^3 FEV_2 = (3,4 ÷ 4,4) dm^3 FEV_3 = (3,5 ÷ 4,8) dm^3
12.	$MMEF_{V1-V2}$	średni przepływ w środku natężonego wydechu; *objętość powietrza, które może być wydmuchane w natężonym wydechu czasie Δt określonym przez wartości objętości V_1, V_2*	$MMEF_{25\text{-}75\%\ FVC}$ = (2,7 ÷ 4,5) dm^3/s $MMEF_{50\text{-}75\%\ FVC}$ = (1,4 ÷ 3,5) dm^3/s
13.	MEF_{V1}	chwilowy przepływ w środku natężonego wydechu; *chwilowa prędkość przepływu powietrza, zmierzona w momencie określonym przez objętość powietrza V_1*	$MEF_{25\%\ FVC}$ = (4,8 ÷ 8,4) dm^3/s $MEF_{50\%\ FVC}$ = (2,5 ÷ 5,3) dm^3/s $MEF_{75\%\ FVC}$ = (0,9 ÷ 2,1) dm^3/s
14.	*PF*	szczytowy wydatek przepływu; *maksymalna prędkość przepływu powietrza w natężonym wydechu*	(5,2 ÷ 10,4) dm^3/s



Rys. 3. Różne sposoby oddychania z zaznaczeniem podstawowych parametrów oddechowych

Warunki pomiarów parametrów spirometrycznych

Powietrze oddechowe znajdujące się w płucach charakteryzują następujące parametry fizyczne: temperatura, ciśnienie, wilgotność oraz skład chemiczny. Rzeczą zrozumiałą jest, że skład chemiczny zależy od tego, czy powietrze wchodzi do płuc z zewnątrz, bogaty w tlen, czy też wychodzi z płuc przyczyniając się do usunięcia zbędnego dla organizmu dwutlenku węgla. Zmierzona wartość objętości powietrza wydechowego zależy od pozostałych parametrów fizycznych, które zgodnie z prawami gazowymi ją określają. Należy zwrócić uwagę na fakt, że powietrze w płucach jest ogrzane do temperatury ciała (+37°C), a wydostając się na zewnątrz do otoczenia ochładza się i zmniejsza swą objętość. Także zmienia się jego ciśnienie i wilgotność (w płucach jest on nasycony parą wodną). Te cechy otoczenia mogą zmieniać się w szerokim zakresie, w wyniku czego zmieniać się będzie objętość płucna oglądana na zewnątrz.

W różny sposób precyzuje się warunki pomiarów spirometrycznych, jednak najczęściej są to:

ATPS – aktualna temperatura i ciśnienie oraz nasycenie powietrza parą wodną w czasie pomiaru,

BTPS – temperatura 37°C (temperatura ciała), ciśnienie zewnętrzne (otoczenia) normalne (760 mm Hg), nasycenie parą wodną: są to warunki, w których powietrze oddechowe znajduje się w płucach.

W celu odpowiedniej normalizacji wyników pomiaru stosuje się następujący wzór przeliczeniowy:

$$V_{BTPS} = V_{ATPS} \cdot \frac{310}{273 + T_0} \cdot \frac{P_B - P_{H_2O}}{P_B - 6,26} \qquad (1)$$

gdzie:

P_B [kPa] – ciśnienie atmosferyczne panujące w otoczeniu,
P_{H2O} [kPa] – ciśnienie pary wodnej w temperaturze otoczenia,
T_0 [°C] – temperatura otoczenia.

Błędy metody uwarunkowane wpływem oporu przepływowego przetwornika spirometrycznego na badany układ oddechowy

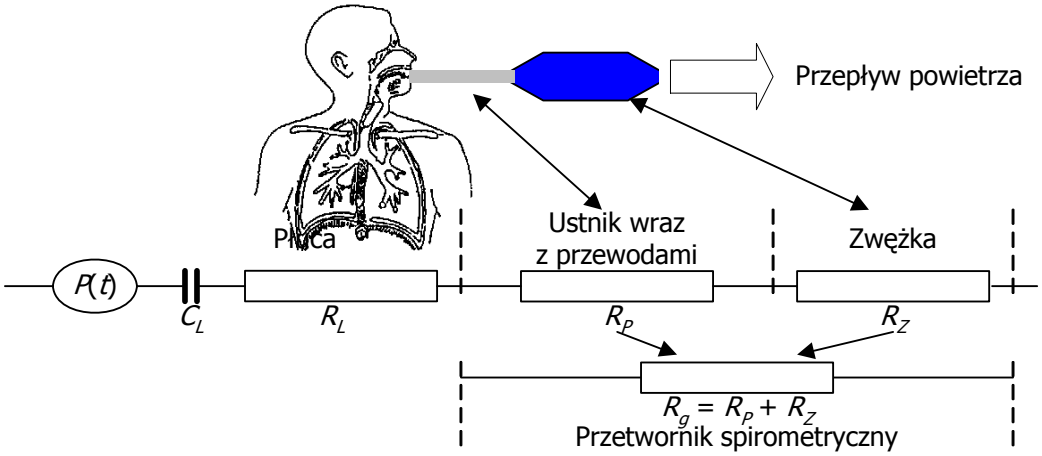
Podczas realizacji natężonego wydechu pacjent zmuszony jest do wykonania wysiłku i przesunięcia porcji powietrza z płuc na zewnątrz przez rurociąg pomiarowy, który stawia opór przepływającemu medium. Zaistniałą sytuację łatwo przedstawić w oparciu o model elektryczny układu oddechowego. Rurociąg połączony jest szeregowo z drogami oddechowymi, a w pierwszym rzędzie z tchawicą. Stanowi to analogię do układu pomiaru prądu za pomocą szeregowo włączonego w obwód amperomierza. W tym przypadku wiadomo, że wynikający stąd błąd metody będzie tym mniejszy, im mniejsza będzie rezystancja wewnętrzna amperomierza w porównaniu z rezystancją obwodu, do którego został włączony.

Wprawdzie analogiczna sytuacja występuje przy badaniu układu oddechowego to jednak należy się liczyć ze specjalnym efektem dodatkowym, występującym jedynie podczas badania takiego właśnie obiektu, jakim są płuca. Mianowicie w przypadku niektórych schorzeń występuje zamknięcie światła niektórych dróg oddechowych. Ich otwarcie może nastąpić tylko wtedy, gdy w płucach zostanie wytworzone wyższe (niż normalnie) ciśnienie napędowe. A taka właśnie sytuacja ma miejsce wtedy, gdy rurociąg pomiarowy stawia znaczny opór. W wyniku tego może nastąpić odblokowanie zamkniętych dotąd pęcherzyków płucnych, co spowoduje zwiększenie się objętości powietrza wydostającego z płuc. Jest to sytuacja wymuszona, a uzyskane rezultaty nie obrazują rzeczywistego stanu płuc.

Opór przetwornika spirometrycznego współdziała z oporem układu oddechowego w pełnym zakresie trwania natężonego wydechu. Toteż wszystkie parametry spirometryczne, w których ujawnia się wpływ oporu przepływowego mogą w trakcie pomiaru ulegać zmianie w zależności od relacji, jaka istnieje między oporami badanego obiektu i przetwornika pomiarowego.

Po dołączeniu przetwornika o oporze przepływu R_g (por. rys. 4) odpowiedź układu w natężonym wydechu ulega zmianie w następujący sposób:

$$V_{Lg}(t) = FVC \cdot \left\{1 - \exp\left[-t/\left(R_L + R_g\right)C_L\right]\right\} \tag{2}$$



Rys. 4. Prezentacja współdziałania oporów przepływowych podczas badań spirometrycznych. Oznaczenia: R_L - opór drzewa oskrzelowego, C_L - podatność tkanki płucnej, $P(t)$ - ciśnienie wymuszające oddychanie

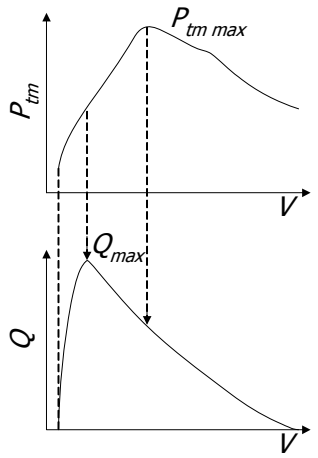
Przy założeniu, że opór przetwornika pozostaje stały podczas całego procesu natężonego wydechu (co jest dużym uproszczeniem) można zauważyć, że każdy parametr natężonego wydechu zostaje wyznaczony z błędem $\delta_g(t)$:

$$\delta_g(t) = \frac{V_{Lg}(t) - V_L(t)}{V_L(t)} \tag{3}$$

<u>Zjawiska towarzyszące natężonemu wydechowi</u>

Oddychanie polega na takim działaniu klatki piersiowej, aby wytworzyć w układzie oddechowym ciśnienia, które umożliwią napływ powietrza do płuc lub jego usunięcie na zewnątrz. Ich wartości zmieniają się w zależności od rodzaju i fazy oddychania.

Natężony wydech wymaga włożenia pewnego wysiłku, ujawniającego się w postaci skoku ciśnienia wymuszającego nagłe usunięcie na zewnątrz powietrza znajdującego się w pęcherzykach płucnych i drogach oddechowych. Obserwowane zmiany prędkości wypływającego powietrza i jego objętości rejestrowane są w postaci krzywej $Q(V)$ (rys. 5).



Rys. 5. Wymuszenie przepływu strumienia objętości powietrza Q z płuc przez generację skoku ciśnienia w natężonym wydechu

Jest to możliwe dzięki pracy mięśni klatki piersiowej, które napierają na elastyczne pęcherzyki płucne. Celem skoku ciśnienia jest wyegzekwowanie maksymalnej wartości przepływu powietrza. Zależy ona od początkowego nachylenia narastającego zbocza krzywej ciśnieniowej $P(V)$ (rys. 5) lecz nie zależy od maksymalnej wartości tego ciśnienia. Po pojawieniu się maksymalnego przepływu ciśnienie to jednak nadal rośnie, co jest skutkiem bezwładności systemu i lepkości powietrza. Widać, że mimo wzrostu ciśnienia przezpłucnego, po pierwszej fazie wzrostu prędkości do Q_{max} następuje powolny jej spadek, aż do zera.

Jeżeli ciśnienie wymuszające maksymalny przepływ będzie wyższe, to tym samym wartość prędkości Q_{max} będzie wyższa i równocześnie pojawi się ona przy wyższej objętości powietrza znajdującego się w płucach.

Od momentu pojawienia się maksymalnej wartości prędkości przepływu, malejący przepływ w dalszej części wydechu jest niezależny od wysiłku uruchamiającego natężony wydech. Obrazuje to działanie mechaniczne płuc, bowiem ciśnienie w drogach oddechowych jest mniejsze od otaczającego, czyli panującego w opłucnej.

Ocena jakości sygnału testującego płuca

Układ oddechowy, jako decydujący o sprawnym działaniu całego organizmu, wymaga rzetelnej oceny sprawności. Toteż światowe organizacje pulmonologiczne *ATS*[1] oraz *ERS*[2] opracowały ścisłe wytyczne dotyczące jakości sygnału testującego. Sygnał ten jest generowany przez samego pacjenta. Toteż ze względu na jego zmienność biologiczną oraz cechy psychofizyczne nie jest możliwe ustalenie cech sygnału na wejściu. Wiedząc o tym jak wielką rolę pełni on w ocenie stanu płuc, zdecydowano się oceniać jego właściwości na podstawie sygnału wyjściowego, który łatwo można zmierzyć. Ustalono kryteria, jakie ma spełniać sygnał wyjściowy w następujący sposób:

1. *KRYTERIUM AKCEPTOWALNOŚCI*, na które składa się:
   a) właściwy początek testu, który charakteryzuje tzw. dobry start, łatwy do oceny przez badającego. Oznacza to, że pacjent dobrze zrozumiał test, wykonał maksymalny wysiłek, zrealizował maksymalny wdech, a krzywa $V(t)$ jest gładka,
   b) właściwie zakończony test (por. rys. 6), co oznacza, że w ostatnich dwóch sekundach wydechu nie następuje zmiana objętości (sygnał osiąga plateau), co równoznaczne jest z tym, że urządzenie kontrolujące nie zauważy zmian poniżej 0.04 dm^3,
   c) odpowiedni czas trwania natężonego wydechu, minimum 6 sekund,
2. *KRYTERIUM POWTARZALNOŚCI* odpowiedzi $V(t)$. Jego spełnienie polega na porównaniu dwóch parametrów oddechowych: maksymalnej objętości wydmuchanego powietrza (*FVC*) oraz objętości powietrza wydmuchanego w pierwszej sekundzie natężonego wydechu (FEV_1), które wyznacza się dla testów spełniających kryterium akceptowalności. Dwa testy uznaje się za powtarzalne, jeśli będą spełnione następujące warunki.
   a) pierwszy dla objętości *FVC*:

[1] American Thoracic Society
[2] European Respiratory Society

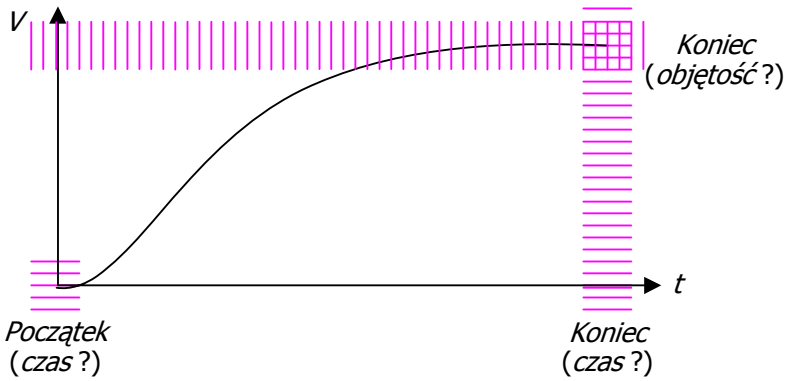
$$\frac{\left(FVC_{max} - FVC_i\right)}{FVC_{max}} < 5\,\% \text{ lub } 0{,}100 \text{ dm}^3 \qquad (4)$$

gdzie FVC_{max} to największa wartość objętości FVC zaobserwowana wśród analizowanych testów, FVC_i to wartość objętości i-tego testu,

b) identyczny warunek dla objętości FEV_1.

Wśród przeprowadzonych kilku testów (5 lub więcej) trzy z nich powinny spełniać wymienione wymagania.

Tak ustalony algorytm postępowania decyduje o właściwym doborze sygnału testującego, który chociaż nieznany, zostaje ostatecznie oceniony od strony wyjścia kontrolowanego układu. Przyjmuje się tutaj milczące założenie, że właściwości badanego obiektu – czyli płuca – nie zmieniają się podczas całego okresu kontroli.



Rys. 6. Zmiana objętości powietrza wydmuchanego w teście natężonego wydechu z zaznaczeniem niepewnych obszarów

Ostatecznie pacjentowi przypisuje się wiele parametrów charakteryzujących natężony wydech, wg. następującego klucza:

1. FVC - jako maksymalna zaobserwowana wartość objętości FVC,
2. FEV_1 - jako maksymalna zaobserwowana wartość objętości FEV_1,
3. inne parametry oddechowe – określone na podstawie tej krzywej, która spełnia warunek, że (FEV_1 + FVC) = max.