

Renata KALICKA¹, Wojciech SŁOMIŃSKI¹, Krzysztof KUZIEMSKI¹

¹ POLITECHNIKA GDAŃSKA KATEDRA INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ

² AKADEMIA MEDYCZNA W GDAŃSKU KATEDRA PULMONOLOGII I ALERGOLOGII

Modelowanie pomiaru spirometrycznego – wartości referencyjne parametrów modelu

Dr hab. inż. Renata KALICKA

Absolwentka Wydziału ETiI Politechniki Gdańskiej. Zatrudniona jako pracownik naukowo-dydaktyczny w Katedrze Inżynierii Biomedycznej Wydziału ETiI PG na stanowisku profesora. Stopień doktora habilitowanego uzyskała w specjalności naukowej inżynieria biomedyczna. Zainteresowania naukowe koncentrują się na modelowaniu procesów biomedycznych i optymalizacji eksperymentu biomedycznego.

e-mail: renata.kalicka@biomed.eti.pg.gda.pl



Dr Krzysztof KUZIEMSKI

Studia Wydział Lekarski Akademii Medycznej w Gdańsku 1989-1996 r. Specjalista chorób wewnętrznych II0, dziedzina: nauki kliniczne niezabiegowe, Adiunkt Kliniki Alergologii Katedry Pneumonologii i Alergologii AM w Gdańsku, Zastępca Ordynatora Kliniki Alergologii, doktor nauk medycznych od 2002 roku. Działalność naukowa: autor 58 prac naukowych, autor podręcznika „Ocena czynności układu oddechowego w codziennej praktyce lekarskiej” Gdańsk Via Medica 2005 rok.

e-mail: k.kuziemski@amg.gda.pl



Mgr inż. Wojciech SŁOMIŃSKI

Absolwent Wydziału Elektroniki Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej. Obecnie jest uczestnikiem studium doktoranckiego w katedrze Inżynierii Biomedycznej. Głównym kierunkiem badań naukowych jest modelowanie układu oddechowego człowieka mające na celu wsparcie procesu diagnostycznego.

e-mail: wojciech.slominski@gmail.com



Streszczenie

W pracy przedstawiono propozycję wykorzystania wyników modelowania pomiaru spirometrycznego do celów diagnostycznych. Zastosowanie praktyczne modelu wymaga określenia wartości referencyjnych parametrów modelu w zależności od cech antropologicznych pacjenta. Zaprezentowano liniowy i nieliniowy opis wyznaczania tych wartości. Błąd aproksymacji wartości referencyjnych parametrów, wyznaczonych z wykorzystaniem nieliniowego równania referencyjnego, umożliwia obliczenie wartości referencyjnej badanego parametru (w zależności od płci, wieku i wzrostu) z dobrą dokładnością, wystarczającą do różnicowania stanów zdrowia. Daje to możliwość wsparcia procesu diagnostycznego nowymi informacjami uzyskanymi dzięki zastosowaniu modelu pomiaru spirometrycznego.

Słowa kluczowe: układ oddechowy, spirometria, modelowanie.

Respiratory mechanism modelling - the reference value of the model parameters

Abstract

The paper presents the application of model respiratory mechanism based on the spirometry measurement. The model parameter estimates are obtained based on the spirometry test results. The model parameters enable to obtain the new information concerning breathing conditions. The diagnostic practice requires the reference values of model parameters, which depended on anthropometric data of the subject. The linear and non-linear reference equations are presented. The Mean Squared Error obtained for the non-linear reference equation, in comparison to quantitative change in parameter value on different state of health condition, allows us to postulate that the spirometry respiratory model parameter estimates could be successfully applied for diagnostic purposes.

Keywords: spirometry, modelling, respiratory mechanism.

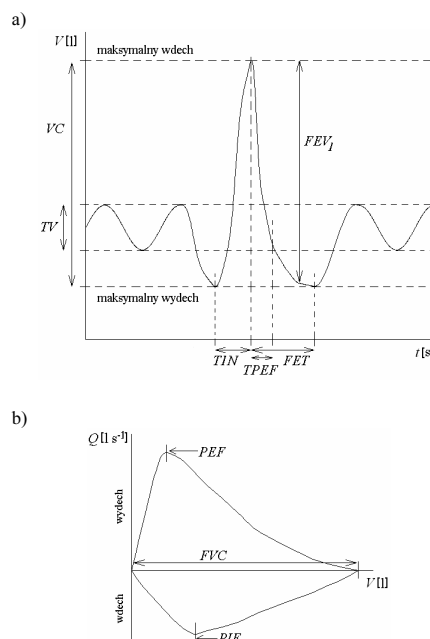
1. Wstęp

Badania czynnościowe układu oddechowego stosowane są do oceny jakości działania układu wymiany gazowej. Najważniejszym badaniem jest powszechnie stosowana spirometria

dynamiczna, która daje możliwość oceny przepływu powietrza w fazach wdechu i wydechu oraz pozwala określić objętości i pojemności płuc. Dzięki zastosowaniu modelowania do interpretacji uzyskanych wyników pomiarów otrzymuje się dodatkowe informacje, które można wykorzystać podczas podejmowania decyzji o wskazanych działaniach terapeutycznych. Celem pracy jest określenie wartości referencyjnych parametrów modelu badania spirometrycznego.

2. Badanie spirometryczne

Istotą badania spirometrycznego jest pomiar objętości $V(t)$ i przepływu $Q(t)$ podczas wykonywanego wdechu i wydechu. Na podstawie uzyskanych wyników wyznacza się parametry respiracji. Podczas badania początkowo wykonywanych jest kilka spokojnych oddechów. Następnie wykonuje się kolejno maksymalny spokojny wydech, maksymalny wdech i ponownie maksymalny wydech. Na rys. 1a przedstawiono zmianę objętości powietrza w płucach $V(t)$ podczas badania spirometrycznego.



Rys. 1. Wyniki badania spirometrycznego: a) zmiana objętości powietrza w płucach $V(t)$ b) krzywa przepływ-objętość $Q(V)$

Fig. 1. The result of spirometry test: a) volume–time curve $V(t)$ b) the flow–volume curves $Q(V)$

Na podstawie uzyskanego przebiegu $V(t)$ definiuje się następujące parametry wentylacji [2]: VC (vital capacity) pojemność życiowa płuc podczas spokojnego oddechu, FVC (forced vital capacity) pojemność życiowa płuc podczas gwałtownego oddechu, TV (tidal volume) objętość oddechowa, FEV_1 (forced expiratory volume during the first second of expiratory) natężona objętość wydechu pierwszosekundowa, $TPEF$ (time to peak expiratory flow) czas osiągnięcia maksymalnego przepływu wydechowego oraz FET (forced expiratory time) czas maksymalnego wydechu.

Obecnie stosowane spirometry z integratorem objętości pozwalają na rejestrację krzywej przepływ-objętość $Q(V)$ (rys. 1b). Najważniejszym elementem badania jest jednoczesny pomiar szybkości natężonego przepływu i objętości przepływającego powietrza zarówno podczas maksymalnego wydechu jak i maksymalnego wdechu.

Na podstawie uzyskanej krzywej $Q(V)$ wyznacza się dodatkowe parametry respiracji [2]: PIF (peak inspiratory flow) szczytowy przepływ wdechowy, PEF (peak expiratory flow) szczytowy przepływ wydechowy oraz FVC (forced expiratory capacity) natężona pojemność życiowa płuc.

Do interpretacji uzyskanych parametrów respiracji wykorzystuje się wartości odniesienia (referencyjne, należne) tj. wartości parametrów uzyskane dla reprezentatywnej populacji osób zdrowych [3, 4, 5]. Zależą one od antropologicznych cech pacjenta (płeć, wiek i wzrost).

Do wyznaczania wartości referencyjnych dla parametrów respiracji zastosowany został algorytm określony przez European Respiratory Society [6]:

$$p = R_1 \cdot H + R_2 \cdot A + R_3, \quad (1)$$

gdzie p oznacza jeden z parametrów respiracji omówionych powyżej, H to wzrost (od 1,45 do 1,95 metra), A wiek (od 25 do 70 lat), zaś R_1, R_2, R_3 to stałe podawane w formie tabelarycznej, odpowiednio dla poszczególnych parametrów respiracji. W pracy rozpatrywano te same przedziały wieku i wzrostu pacjentów, których dotyczą powyższe ustalenia.

Stale współczynniki R_1, R_2, R_3 dla parametrów respiracji FEV_1, FVC i PEF , opublikowane przez European Respiratory Society, przedstawiono w tab. 1 [6]. Parametry respiracji wykazują silniejszą zależność od wzrostu (R_1) niż zależność od wieku (R_2).

Tab. 1. Współczynniki równania referencyjnego dla FEV_1, FVC i PEF [6]
Tab. 1. The values of coefficients for FEV_1, FVC and PEF [6]

Współczynnik równania referencyjnego	R_1	R_2	R_3	R_1	R_2	R_3
	Mężczyźni			Kobiety		
FVC	5,760	-0,026	-4,340	4,430	-0,026	-3,280
FEV_1	4,300	-0,029	-2,490	3,950	-0,025	-2,600
PEF	6,140	-0,043	0,150	5,500	-0,030	-1,110

Gdy wartości parametrów respiracji są zbliżone do 100% wartości referencyjnej, uznawane są za prawidłowe. Natomiast wartości wykazujące różnicę większą niż 20% w stosunku do wartości odniesienia interpretowane są jako nieprawidłowe [7].

3. Model spirometrii

Badanie spirometryczne dostarcza informacji o wartościach chwilowych przepływu i objętości. Najważniejszym elementem badania spirometrycznego jest manewr maksymalnego wdechu i maksymalnego wydechu. Przedmiotem modelowania jest odpo-

wiadający tym manewrom fragment krzywej $V(t)$ z rys. 1a. Opracowany model [8, 9] (rys. 2) opisuje przepływ powietrza na poziomie ust, gdzie $Q_{in}(t)$ odpowiada maksymalnemu wdechowi a $Q_{out}(t)$ maksymalnemu wydechowi. Do modelowania wykorzystano funkcje sklejane (spline functions). Zachowano ciągłości funkcji sklejanych do pierwszej pochodnej włącznie.

Maksymalny przepływ podczas wdechu $Q_{in}(t)$ został zamodelowany za pomocą funkcji:

$$Q_{in}(t) = A_{in} \cdot \sin(\varpi \cdot t) \quad t_0 \leq t \leq t_1 \quad (2)$$

gdzie A_{in} to amplituda, ϖ pulsacja, (t_0, t_1) czas trwania wdechu. Maksymalny przepływ na poziomie ust podczas wydechu $Q_{out}(t)$ opisano za pomocą dwóch funkcji eksponencjalnych:

$$Q_{out}(t) = \begin{cases} -A_{out1} \cdot (1 - e^{-B_{out1} \cdot (t-t_1)}) & t_1 < t \leq t_2 \\ -A_{out2} \cdot e^{-B_{out2} \cdot (t-t_1)} + const & t_2 < t \leq t_3 \end{cases} \quad (3)$$

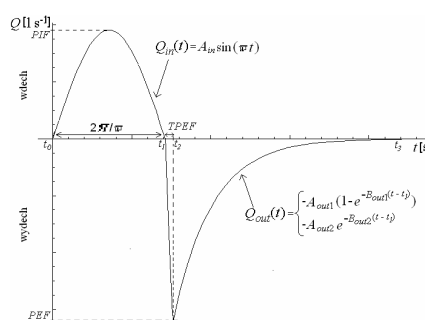
gdzie $A_{out1}, B_{out1}, A_{out2}, B_{out2}$ są parametrami funkcji regresji.

Zaproponowany model badania spirometrycznego został opisany wektorem parametrów:

$$p = [p_1, p_2, \dots, p_i] = [A_{in}, \varpi, A_{out1}, B_{out1}, A_{out2}, B_{out2}], \quad i = 1, 2, \dots, 6.$$

Dostępne dane pomiarowe na podstawie, których przeprowadzono identyfikację parametrów modelu uporządkowano w wektorze pomiarów

$$y = [y_1, y_2, \dots, y_j] = [FEV_1, FVC, PIF, PEF, TPEF], \quad j = 1, 2, \dots, 5.$$



Rys. 2. Model przepływu powietrza podczas $Q_{in}(t)$ i $Q_{out}(t)$

Fig. 2. The modelled flow-time curves $Q_{in}(t)$ and $Q_{out}(t)$

Przeprowadzono badania wrażliwości parametrów modelu na zmiany parametrów respiracji FEV_1 i FVC [8, 9]. Zmiany parametrów respiracji związane były ze zmianami w układzie oddechowym o charakterze obturacyjnym i mieszanym. Postawiono pytanie: czy zmiany wartości parametrów modelu, towarzyszące zmianom obturacyjnym i mieszanym, dają możliwość różnicowania zmian w układzie oddechowym. Zmianom obturacyjnym towarzyszą zmiany FVC o 20% w stosunku do wartości referencyjnej. Parametry modelu $\varpi, A_{out1}, B_{out1}, A_{out2}, B_{out2}$ wykazały wrażliwość na to zaburzenie. Zmiany wynoszą odpowiednio 25,11%, 36,67%, 8,52%, 6,51, 21,94% [9]. Równoczesne zmniejszenie FEV_1 i FVC o 20% (zmiany mieszane) powoduje odpowiednio 25,11%, 36,67%, 8,52%, 7,81, 32,65% zmianę wartości parametrów modelu $\varpi, A_{out1}, B_{out1}, A_{out2}, B_{out2}$ [9]. Wyniki pokazały, że wrażliwość ϖ, A_{out1} i B_{out2} zarówno na zmiany obturacyjne jak i na zmiany mieszane jest większa niż obecnie

stosowanych parametrów respiracji FEV_1 i FVC . Wskazuje to na możliwość bardziej precyzyjnej diagnostyki układu oddechowego.

4. Wartości referencyjne parametrów modelu

Wartości referencyjne parametrów respiracji (dla wieku do 25 do 75 lat i wzrostu od 1,45 do 1,95 metra, oddzielnie dla kobiet i dla mężczyzn) zostały wyliczone na podstawie równania referencyjnego (1) dla wartości współczynników R_1, R_2, R_3 przedstawionych w tabeli 1. Parametry FEV_1, FVC i PEF są standaryzowane natomiast wartości FIT i FET nie mają ściśle określonych norm.

Następnie powyższe wyniki zostały wykorzystane do wyznaczenia wartości referencyjnych parametrów $p = [A_{in}, \varpi, A_{out1}, B_{out1}, A_{out2}, B_{out2}]$. Każdy parametr p estymowano na podstawie wartości parametrów respiracji będących wartościami referencyjnymi dla danego wieku i wzrostu. Badania zostały przeprowadzone rozdzielnie dla kobiet i mężczyzn. Uzyskane wyniki estymacji parametrów modelu $p = [A_{in}, \varpi, A_{out1}, B_{out1}, A_{out2}, B_{out2}]$ przedstawione są na rys. 3.

Porównanie wykresów otrzymanych dla kobiet i mężczyzn ukazuje największe różnice pomiędzy wartościami referencyjnymi parametrów w przypadku parametru B_{out2} . Znaczące różnice również wykazują parametry A_{out2} i B_{out1} . Pozostałe parametry A_{in}, ϖ, A_{out1} charakteryzują się także zróżnicowaniem w zależności od płci jednakże różnice są niewielkie.

Następnie dla otrzymanych wartości parametrów modelu, w badanym zakresie wzrostu i wieku, wyznaczono współczynniki równania referencyjnego dla parametrów modelu w postaci (1), podobnie jak dla parametrów respiracji. Rezultat dopasowania równania referencyjnego (1) do wyników estymacji parametrów modelu zaprezentowano w tab. 2.

Tab. 2. Wartości współczynników równania referencyjnego (1) dla parametrów modelu

Tab. 2. Values of R_1, R_2 and R_3 for model parameters.

Współczynnik równania referencyjnego	R_1	R_2	R_3	R_1	R_2	R_3
	Mężczyźni			Kobiety		
A_{in}	4,605	-0,032	0,113	4,125	-0,022	0,832
ϖ	-1,878	0,003	6,125	-4,032	0,023	9,777
A_{out1}	0,677	0,005	-2,970	6,609	-0,030	-12,622
B_{out1}	-6,333	0,011	-2,070	-10,253	0,058	5,159
A_{out2}	4,945	-0,035	5,842	-1,828	0,017	17,643
B_{out2}	-1,851	0,007	5,264	-4,695	0,027	10,019

Równanie referencyjne (1) to równanie płaszczyzny. Jak wynika z rys. 3, nie dla wszystkich parametrów obserwowana zmienność ich wartości ma charakter liniowy. Od liniowości najbardziej odbiegają wyniki przedstawione na rys. 3 c) i e) dla kobiet. Zatem równanie referencyjne (1) (nazywane w dalszej części pracy aproksymacją I) zaproponowane przez European Respiratory Society nie w każdym przypadku jest odpowiednie. Zastosowanie go np. dla parametru A_{out1} dla kobiet powoduje, że różnice (residua) R pomiędzy wartościami referencyjnymi tego parametru oraz wartościami uzyskiwanymi z aproksymacji równaniem referencyjnym (1) są znaczące. Różnice te (aproksymacja I) przedstawiono na rys. 4.

Aby zmniejszyć błąd R należy poszukiwać innego równania dającego lepsze dopasowanie do charakteru zmian parametrów modelu względem płci, wieku i wzrostu.

Jako miara jakości dopasowania równania referencyjnego do zbioru wartości referencyjnych parametrów modelu przyjęty został błąd średniokwadratowy MSE (Mean Squared Error) zdefiniowany następująco:

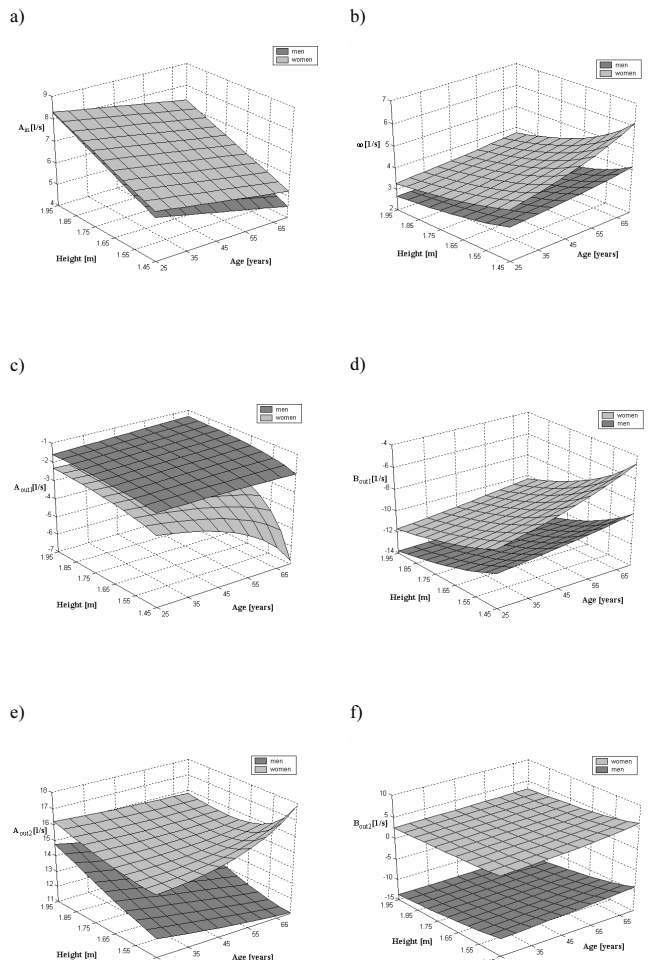
$$MSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(p_i - p_{ri})^2}{n(n-1)}}, \tag{4}$$

gdzie $p_i = p(A_r, H_s), r, s = 1, \dots, n$ oznacza wartość referencyjną parametru modelu dla danego wieku i wzrostu, n ilość rozpatrywanych punktów na płaszczyźnie (A, H) , p_{ri} to wartość parametru obliczona na podstawie równania referencyjnego.

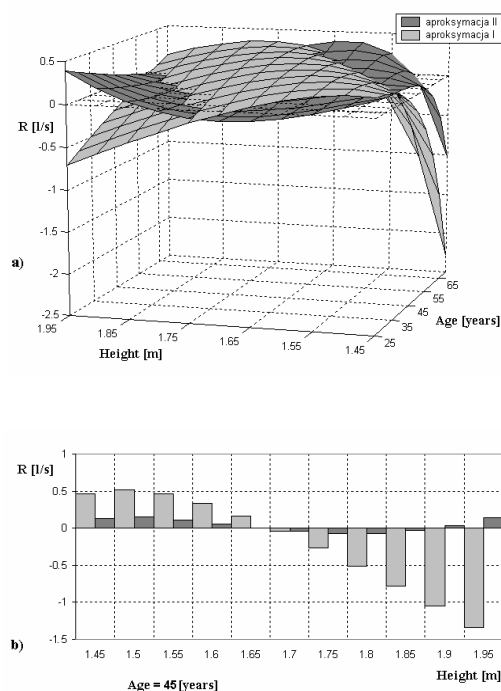
Ocena przydatności zastosowania danego równania referencyjnego musi zawierać dwa elementy: jak najmniejsza wartości błędu MSE oraz brak wyraźnych skupień residuów. Najlepsze rezultaty dopasowania, dla całego zakresu wieku i wzrostu, uzyskano dla nieliniowego równania referencyjnego (5).

$$p = Z_1 + Z_2 A + Z_3 H + Z_4 AH + Z_5 A^2 + Z_6 H^2 + Z_7 A^2 H^2 \tag{5}$$

gdzie p to parametr modelu, H i A to wzrost (w metrach) i wiek (w latach), zaś $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6, Z_7$ to stałe współczynniki równania. W dalszej części pracy wykorzystanie równania referencyjnego (5) nazwano aproksymacją II. Możliwe jest także zaproponowanie opisu w postaci lokalnych równań liniowych i nieliniowych. Wiązałoby się to jednak z potrzebą wyznaczenia lokalnych zbiorów estymat parametrów.



Rys. 3. Estymowane wartości parametrów modelu badania spirometrycznego
Fig. 3. The estimated values of the spirometry model parameters



Rys. 4. Różnica R pomiędzy wartościami referencyjnymi A_{out1} a aproksymacją I oraz aproksymacją II dla tego parametru w całym obszarze zmian wieku Age i wzrostu Height (a) oraz dla ustalonego wieku Age=45 i całego przedziału zmian wzrostu Height (b)

Fig. 4. The differences between reference value A_{out1} and its approximations II and I (a) for the entire range of Age and of Height and (b) for Age=45 and the entire range of Height

Tab. 3 ukazuje otrzymane wartości błęd MSE dla obu rozpatrywanych aproksymacji.

Tab. 3. Dokładność MSE parametrów modelu wyznaczonych na podstawie aproksymacji I oraz II

Tab. 3. The accuracy MSE of model parameters based on the approximation I and II for model parameters

p	Mężczyźni		Kobiety	
	Aproksymacja I	Aproksymacja II	Aproksymacja I	Aproksymacja II
A_{in}	0,1234 %	0,0958 %	0,2331 %	0,0001 %
ω	1,0914 %	0,4740 %	2,3310 %	0,4357 %
A_{out1}	0,8817 %	0,5789 %	6,4663 %	1,7087 %
B_{out1}	2,7958 %	0,4980 %	4,9761 %	0,6997 %
A_{out2}	1,0671 %	0,5378 %	5,6556 %	1,4914 %
B_{out2}	1,0959 %	0,4645 %	3,0245 %	0,6586 %

Najistotniejszym rezultatem uzyskanym po wykorzystaniu równania (5) jest zmniejszenie różnicy R pomiędzy referencyjną a aproksymowaną wartością parametrów dla osób starszych o niskim wzroście. Przykładem jest parametr A_{out1} . Na rys. 4 zaprezentowano porównanie różnicy R dla obu analizowanych aproksymacji. Zastosowanie nieliniowego równania referencyjnego (5) spowodowało ponad dwukrotne zmniejszenie błęd dla najniższych i najstarszych kobiet.

Poza uzyskaniem bardziej zrównoważonego rozłożenia błęd w całym zakresie wieku i wzrostu (mniejsze i mniej skupione residua), aproksymacja II również wykazała mniejszy błąd MSE .

Najbardziej spektakularną poprawą zaobserwowano dla kobiet w przypadku parametrów A_{out1} , B_{out1} i A_{out2} . Aproksymacja I wykazała, odpowiednio, błąd 6,4663 %, 4,9761 % i 5,6556 % zaś aproksymacja II 1,7087 %, 0,6997 % i 1,4914 %.

Reasumując wykorzystanie równania (5) jako równania referencyjnego dla wyliczania wartości parametrów modelu w zależności od płci, wieku i wzrostu umożliwia zmniejszenie błęd aproksymacji. Nieliniowy opis wartości należnych oraz dobra wrażliwość parametrów modelu na zmiany chorobowe pozwala zastosować model pomiaru spirometrycznego jako wsparcie procesu diagnostycznego.

5. Podsumowanie

Interpretacja uzyskanych wyników badania spirometrycznego dokonywana jest przez porównanie z wartościami odniesienia parametrów respiracji. Wykorzystanie modelu spirometrii w praktyce diagnostycznej wymaga wyznaczenie wartości referencyjnych dla poszczególnych parametrów modelu. W pracy przedstawiono dwa sposoby wyznaczania wartości referencyjnych: z wykorzystaniem liniowego i nieliniowego równania referencyjnego. Błąd aproksymacji parametrów modelu uzyskany przy wykorzystaniu nieliniowego równania referencyjnego jest mniejszy niż dla równania liniowego. Ta poprawa dokładności pozwala na wyznaczenie wartości odniesienia dla poszczególnych parametrów modelu z dobrą dokładnością. Umożliwia to wykorzystanie parametrów modelu spirometrii jako źródło dodatkowych informacji ułatwiających podejmowanie decyzji diagnostycznych i terapeutycznych.

6. Literatura

- [1] P. Gutkowski, W. Lubiński, T. Zielonka: Spirometria, Medical Tribune, Warszawa 2005.
- [2] P. Quanjer, J. Tammeling, J. Cotes: Long volumes and forced ventilatory flows: report of working party, standardization of lung function tests, Eur. Respir. J., nr 6, 1993.
- [3] American Thoracic Society, Standardization of spirometry. Am. Respir. Crit. Care Med., nr 152, 1995.
- [4] E. Falaschettii, J. Laiho, P. Primatesa: Prediction equations for normal and low lung function from the Health Survey for England, Eur. Respir. J., nr 23, 2004.
- [5] Guidelines for the measurement of respiratory function, Recommendations of the British Thoracic Society and the Association of Respiratory Technicians and Physiologists. Resp. Med., nr 88, 1994.
- [6] Standardized lung function testing. Official statement of the European Respiratory Society, Eur. Respir. J., nr 16, 1993.
- [7] J. Kowalski, A. Koziorowski, L. Radwan: Ocena czynności płuc w chorobach układu oddechowego, Borgis, Warszawa 2004.
- [8] R. Kalicka, W. Słomiński, K.Kuziemski: Modelling of spirometry. Diagnostic usefulness of model parameters, EUROCON 2007: IEEE Region 8: the international conference on „Computer as a tool”, Warszawa, 2007.
- [9] R. Kalicka, W. Słomiński, K.Kuziemski: Wykorzystanie wyników modelowania do interpretacji badań spirometrycznych, Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna XV krajowa konferencja naukowa, Wrocław, 2007.