

# Analiza sygnałów wibroakustycznych generowanych podczas kaszlu w przewlekłych chorobach układu oddechowego

## Cough-generated vibroacoustic signals analysis in chronic pulmonary diseases

Mieczysław Grabowski<sup>1</sup>, Przemysław Pozański<sup>1</sup>, Iwona Damps-Konstańska<sup>2</sup>,  
Małgorzata Krajnik<sup>3</sup>, Ewa Jassem<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Centrum Techniki Morskiej S.A., ul. Dickmana 62, 81-109 Gdynia, tel. +48 58 666 53 32, e-mail: mieczyslaw.grabowski@ctm.gdynia.pl

<sup>2</sup>Katedra Pneumonologii i Alergologii, Klinika Alergologii, Gdański Uniwersytet Medyczny, ul. Dębinki 7, 80-211 Gdańsk

<sup>3</sup>Katedra i Zakład Opieki Paliatywnej, Collegium Medicum Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, ul. M. Skłodowskiej-Curie 9, 85-094 Bydgoszcz

### Streszczenie

Kaszel jest jednym z najbardziej uciążliwych i jednocześnie najbardziej powszechnych objawów w przebiegu przewlekłych chorób układu oddechowego. Dotychczasowe tradycyjne metody badań częstości i natężenia kaszlu polegają na obserwacji chorego, rejestracji audio-wideo, a następnie na zliczaniu występujących incydentów. Międzynarodowe organizacje zajmujące się chorobami układu oddechowego (European Respiratory Society, American College of Chest Physicians) zalecają stosowanie skomputeryzowanych i zautomatyzowanych metod pomiarowych, pozwalających na ambulatoryjną, obiektywną ocenę kaszlu u chorych. Zjawisko kaszlu wywołuje drgania klatki piersiowej chorego z jednoczesną emisją charakterystycznych zaburzeń akustycznych. Rejestracja i analiza powyższych sygnałów wibroakustycznych umożliwia zarówno monitorowanie częstości kaszlu, jak i ocenę jego natężenia, zatem metoda ta będzie przydatna do oceny skuteczności procesu leczenia chorych. W artykule przedstawiono metodę badań oraz wyniki pilotażowych pomiarów, przeprowadzonych przy współpracy Centrum Techniki Morskiej (CTM) z Akademią Medyczną w Gdańsku oraz Collegium Medicum Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Bydgoszczy. Rejestrowano sygnały wibroakustyczne generowane podczas kaszlu u pacjentów z chorobą obturacyjną układu oddechowego i rakiem płuc. Do badań zastosowano system analizatora typu PULSE produkcji Bruel & Kjaer. Wykonano jednoczesną rejestrację sygnałów akustycznych i drgań, a następnie sygnały te poddano analizie.

**Słowa kluczowe:** kaszel, analizator kaszlu, wibroakustyka, mikrofon, akcelerometr

### Abstract

Cough is one of the most bothersome and frequent symptoms of chronic pulmonary diseases. Traditional examination methods rely on patient observation, audio-video registration and incidents counting. European Respiratory Society and American College of Chest Physicians recommend using computer based

and automated measuring methods, which allow objective evaluation of patients cough. Cough phenomenon produces chest vibrations with simultaneous characteristic acoustic disturbances. Registration and analysis of those vibroacoustic signals enable cough frequency and intensity monitoring, which means that this method will be useful for evaluation of the therapy effectiveness. This paper presents the method and pilot study results that were obtained by R&D Marine Technology Centre in cooperation with the Medical University of Gdańsk and Collegium Medicum in Bydgoszcz. Cough vibroacoustic signals of patients with chronic pulmonary diseases and lung cancer were recorded. Bruel & Kjaer Pulse analyzer has been used during the examination. Registration and analysis of the acoustic and vibration signals have been performed.

**Key words:** cough, cough analyzer, vibroacoustics, microphone, accelerometer

### Wprowadzenie

Przewlekły kaszel stanowi 10-38% konsultacji lekarzy specjalistów chorób płuc. Z powodu kaszlu cierpi 40% chorych na zaawansowane nowotwory, zaś w przypadku zaawansowanego raka płuca liczba kaszlących przekracza 80% [1]. Subiektywną ocenę nasilenia kaszlu u chorego przeprowadza się na podstawie wywiadu, a także za pomocą skal: analogowej skali wizualnej, skali opracowanej przez Europejskie Towarzystwo Oddechowe (ERS – European Respiratory Society). Z tego względu podjęto badania nad opracowaniem automatycznego analizatora do obiektywnej oceny uciążliwości kaszlu u chorych [2]. Do tej pory podejmowano próby skonstruowania różnego rodzaju urządzeń rejestrujących dźwięki lub ruch przepony, które pozwoliłyby na obiektywną ocenę nasilenia kaszlu, jego częstości w ciągu dnia i w nocy [3]. Według rekomendacji ERS, tego typu urządzenia powinny być wykorzystywane w codziennej diagnostyce chorych cierpiących z powodu kaszlu, do oceny działania leków przeciwkaszlowych w badaniach klinicznych oraz naukowych nad chorobami z przewlekłym kaszlem, w tym m.in. chorobami obturacyjnymi dróg oddechowych, rakiem płuca, refluksem żołądkowo-przełykowym [4-7].

## Metoda badań

Kaszel wywołuje u chorego nagłe zmiany objętości płuc oraz intensywną pracę mięśni oddechowych, w tym przepony, czego bezpośrednim wynikiem są drgania klatki piersiowej. W czasie kaszlu generowane są również zaburzenia akustyczne. Z tego względu do rejestracji zdarzeń kaszlu zastosowano metodę równoległej rejestracji drgań klatki piersiowej oraz poziomu ciśnienia akustycznego. W celu wstępnego rozpoznania sygnałów wibroakustycznych generowanych przez chorych wykonano pomiary pilotażowe grupy 12 osób cierpiących z powodu przewlekłego kaszlu. Pomiary wykonano w ramach projektu „Ocena kaszlu u chorych na obturacyjne choroby układu oddechowego przy użyciu kaszlotmetru”, prowadzonego przez Katedrę i Zakład Opieki Paliatywnej CM UMK w Bydgoszczy oraz Katedrę Pneumonologii i Alergologii Gdańskiego UM [8].

Celem pomiarów sygnałów wibroakustycznych generowanych w czasie kaszlu było określenie jego charakterystycznych (wyróżniających się) cech. Zdefiniowanie indywidualnych cech kaszlu w porównaniu z innymi zdarzeniami umożliwi opracowanie algorytmów detekcji, rejestracji oraz monitorowania intensywności kaszlu w procesie ambulatoryjnego leczenia chorych. Do pomiarów sygnałów wibroakustycznych zastosowano aparaturę produkcji firmy Brüel & Kjaer. Drgania mierzono za pomocą akcelerometru typu 4507B005 o masie 4,8 g, o czułości 100 mV/ms<sup>2</sup>, częstotliwości rezonansowej ok. 18 kHz. Akcelerometr zamocowano bezpośrednio na klatce piersiowej pacjenta, w okolicy mostka. Oś o największej czułości akcelerometru była prostopadła do powierzchni mostka badanego pacjenta. Wartości poziomów ciśnienia akustycznego mierzono za pomocą mikrofonu pomiarowego typu 4145 o czułości 52,5 mV/Pa i zakresie dynamiki od 10 do 146 dB re

20  $\mu$ Pa. Mikrofon zamocowano na statywie w odległości 1 m od badanego pacjenta. Archiwizację i analizę sygnałów z torów pomiarowych wykonano z wykorzystaniem systemu analizatora PULSE typu 3560 C. Rejestrację sygnałów wykonano w paśmie częstotliwości od DC do 25,6 kHz, z częstotliwością próbkowania 65536 Hz. Jednym z elementów stopnia wejściowego analizatora jest układ 24-bitowego przetwornika ADC, zapewniający zakres dynamiki od 110 dB do 130 dB (zależnie od wybranej czułości kanału). Zastosowana metoda pomiarowa zapewnia niezależną, dwukanałową rejestrację i analizę sygnałów wibroakustycznych. Jednocześnie umożliwia ona porównanie sygnałów pochodzących od badanej osoby (np. śmiech, krzyk, chrząkanie, mowa itp.). Na etapie przetwarzania i analizy danych umożliwia to określenie swoistości incydentów kaszlu oraz rozróżnienie kaszlu od innych zdarzeń wibroakustycznych [9-11]. Ze względu na cechy funkcjonalne systemu analizatora (m.in. odsłuch rejestrowanych zdarzeń) metoda pomiaru może być również weryfikowana tradycyjnymi metodami badań w zakresie częstości i natężenia kaszlu [12]. Schemat blokowy metody pomiarowej przedstawiono na rys. 1.

Do analizy sygnałów zastosowano wybrane algorytmy, zaimplementowane w systemie analizatora PULSE oraz dostępne w programie Matlab. Analizę sygnałów wibroakustycznych prowadzono w kilku etapach. Etapem wstępnym było odsłuchanie zarejestrowanych sygnałów i wyselekcjonowanie kilku charakterystycznych zdarzeń, między innymi takich, jak kaszel, śmiech, chrząkanie, krzyk. W diagnostyce pacjentów z przewlekłymi chorobami układu oddechowego priorytetowe znaczenie ma określenie swoistości zjawiska kaszlu na tle innych zakłóceń. W kolejnym etapie przeprowadzono analizę wybranych sygnałów w dziedzinie amplitud sygnałów, dynamiki zmian, zależności czasowych i energetycznych. Następnie sygnały poddano analizie

FFT (szybka transformata Fouriera) w całym zakresie pracy przetworników pomiarowych. Na podstawie wymienionych analiz określono pasma częstotliwości poszczególnych zdarzeń. Dla analizatora FFT ustalono następujące parametry pracy: 1600 linii, zakładkowanie 66,67%, uśrednianie eksponentjalne oraz okno Hanninga. Wyzwalanie analizy powtarzano

Tabela 1 Charakterystyka chorych

Płeć	Wiek	Diagnoza	Natężenie kaszlu według NRS*	Natężenie kaszlu wg VAS**	Ocena uciążliwości kaszlu – dzień***	Ocena uciążliwości kaszlu – noc****
K	52	astma	6	6,5	4	4
K	64	choroba refluksowa przełyku	7	1	3	3
M	25	nadreaktywność oskrzeli	3	2	1	1
M	45	zespół rakowiaka	2	0	0	0
M	65	rak płuca	2	1	1	2
K	52	przewlekła obturacyjna choroba płuc	6	5,5	4	3
K	56	płyn w jamie opłucnowej	3	2,5	1	1
M	70	rak płuca, przewlekła obturacyjna choroba płuc	3	3,5	2	2
M	55	astma	7	7	3	1
M	65	przewlekła obturacyjna choroba płuc	2	2,5	3	2
K	64	przewlekła obturacyjna choroba płuc	3	1	2	3
M	79	rak płuca, przewlekła obturacyjna choroba płuc	2	5	5	3

### Legenda:

\*NRS – Numerical Rating Scale (skala numeryczna);

\*\*VAS – Visual Analogue Score (skala analogowo-wizualna);

\*\*\*Ocena kaszlu w ciągu dnia:

0 – kaszel nie występuje; 1 – kaszel występuje przez krótki czas w ciągu dnia;

2 – kaszel występuje dwukrotnie w ciągu dnia;

3 – kaszel występuje często w ciągu dnia, ale nie zaburza mojej aktywności;

4 – kaszel występuje często w ciągu dnia i wpływa na wykonywanie codziennych czynności;

5 – występuje męczący kaszel w ciągu całego dnia.

\*\*\*\*Ocena kaszlu w nocy:

0 – kaszel nie występuje;

1 – kaszel wyłącznie przy zasypianiu;

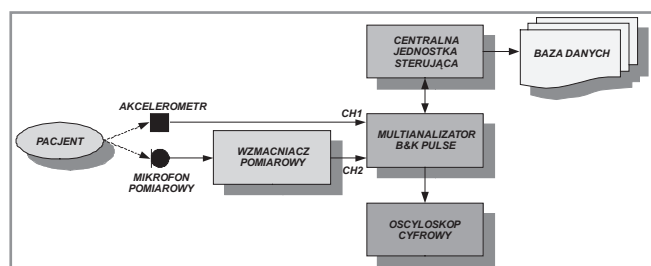
2 – pojedynczy atak kaszlu powodujący obudzenie lub kaszel wcześniej rano;

3 – częsty kaszel powodujący obudzenie;

4 – częsty kaszel utrzymujący się przez znaczną część nocy;

5 – męczący kaszel w ciągu całej nocy.

cyklicznie w odstępach czasu co 10 ms. Wyniki analizy FFT zasugerowały zastosowanie filtrowania sygnałów. Do tego celu wykorzystano dostępny w bibliotekach filtr pasmowy o skończonej odpowiedzi impulsowej 30. rzędu o paśmie przenoszenia od 9 kHz do 15 kHz. Równolegle sygnał analizowano za pomocą detektora szczytowego oraz wyznaczano korelację wzajemną pomiędzy sygnałem akustycznym i sygnałem z akcelerometru. Końcowym etapem przetwarzania sygnałów było ich całkowanie w dziedzinie częstotliwości.

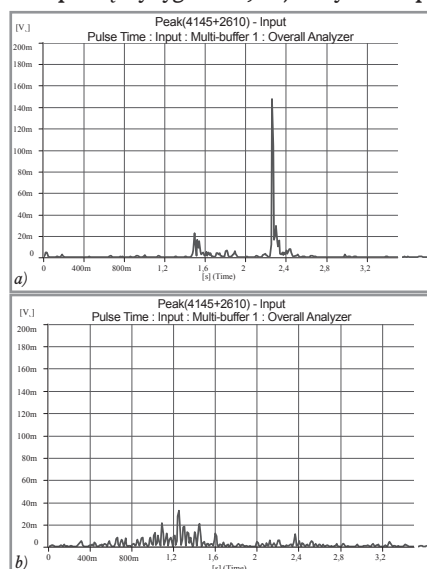


Rys. 1 Schemat blokowy metody pomiarowej

## Wyniki badań

Na podstawie analizy zależności czasowo-amplitudowych sygnałów wibroakustycznych generowanych w czasie kaszlu można stwierdzić, iż incydenty kaszlu mają charakter impulsowy. Spowodowane jest to nagłymi zmianami objętości płuc, czego efektem są drgania klatki piersiowej. Potwierdzają to wyniki detekcji szczytowej – rys. 2. Analizy FFT rejestrowanych sygnałów wykazały, że w większości przypadków sygnały związane bezpośrednio z incydentami kaszlu mają szersze pasmo częstotliwości od pozostałych zjawisk. Z tego względu kolejnym etapem badań było zawężenie pasm częstotliwości analiz poszczególnych zdarzeń. Dla częstotliwości powyżej 8 kHz kaszel charakteryzuje się o ok. 20 dB wyższym poziomem w porównaniu z pozostałymi incydentami. Przykładowe widma zarejestrowanych sygnałów wybranych zachowań pacjentów (kaszlu, chrząknięcia, krzyku) przedstawiono na rys. 3-5.

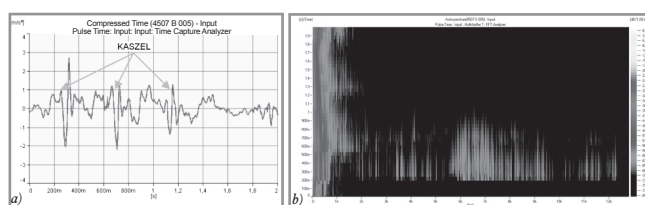
Ze względu na charakter zjawisk rejestrowanych za pomocą mikrofonu i akcelerometru korelacja wzajemna sygnałów wykorzystywana jest jako wskaźnik tego, czy dany incydent pochodzi od monitorowanej osoby. Analiza korelacyjna wykazała przesunięcie w czasie o ok. 3 ms pomiędzy sygnałami, co jest wynikiem propagacji fali akustycznej



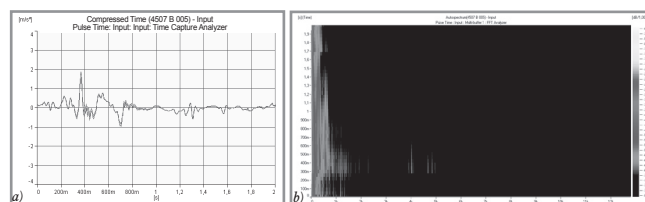
Rys. 2 Wyniki detekcji szczytowej dla kaszlu (a) oraz dla mowy i śmiechu (b)

w powietrzu na odległości 1 m (pacjent – mikrofon). Powyższa wartość czasu opóźnienia sygnału z mikrofonu w stosunku do sygnału z akcelerometru potwierdza, że rejestrowane sygnały pochodzą od badanych osób, a nie z otoczenia. Właściwość ta jest szczególnie istotna przy monitorowaniu pacjentów w ich codziennym środowisku.

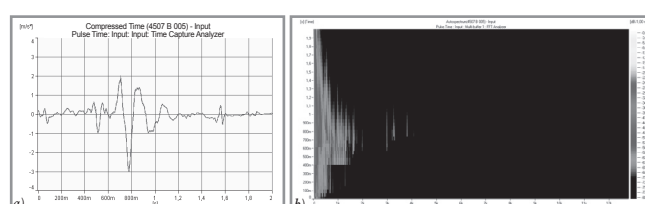
Wyniki badań wibroakustycznych grupy pacjentów wykazały, że maksymalne warto-



Rys. 3 Wynik rejestracji (a) i analizy FFT (b) incydentów kaszlu

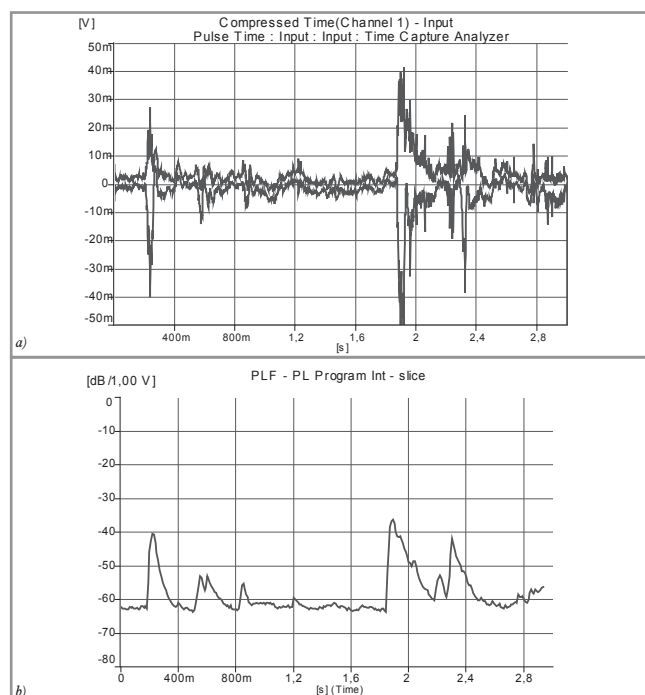


Rys. 4 Wynik rejestracji (a) i analizy FFT (b) odgłosu chrząknięcia

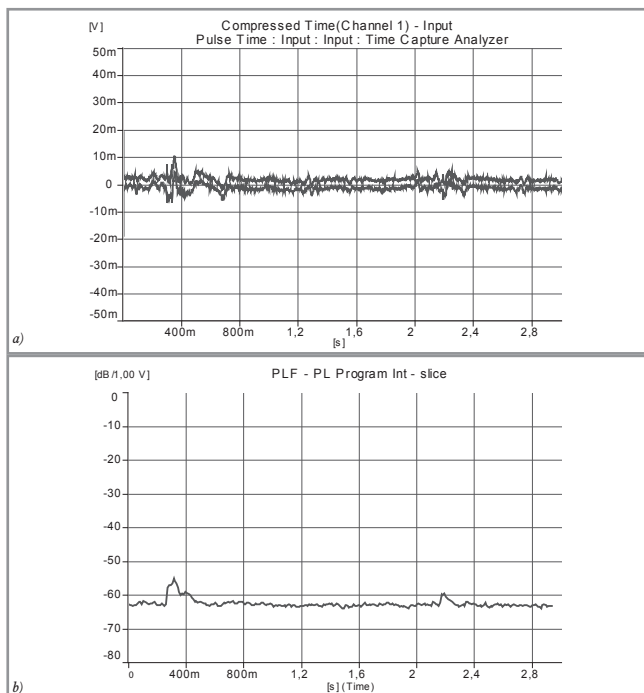


Rys. 5 Wynik rejestracji (a) i analizy FFT (b) krzyku pacjenta

ści amplitud drgań podczas incydentów kaszlu były wyższe o 10 dB do 15 dB w porównaniu z wartościami amplitud incydentów chrząknięcia i o 6 dB do 10 dB wyższe od amplitud incydentów krzyku. Znaczące były również różnice wartości górnych częstotliwości granicznych i odpowiednio wynosiły: dla chrząknięcia ok. 5 kHz, dla krzyku ok. 7 kHz, dla kaszlu ok. 14 kHz (przy zachowaniu odstepu wartości poziomów składowych widma pomiędzy sygnałami kaszlu od poszczególnych zdarzeń ok. 20-30 dB). Zarejestrowane sygnały drgań poddano filtracji pasmowej (od 9 kHz do 15 kHz), a następnie wyznaczono całki tych sygnałów w dziedzinie częstotliwości. Przykładowe wyniki powyższych operacji dla wybranych zdarzeń przedstawiono na rys. 6-8.



Rys. 6 Przebieg czasowy po filtracji (a) i wyniki całkowania przefiltrowanych sygnałów drgań dla incydentów kaszlu (b)



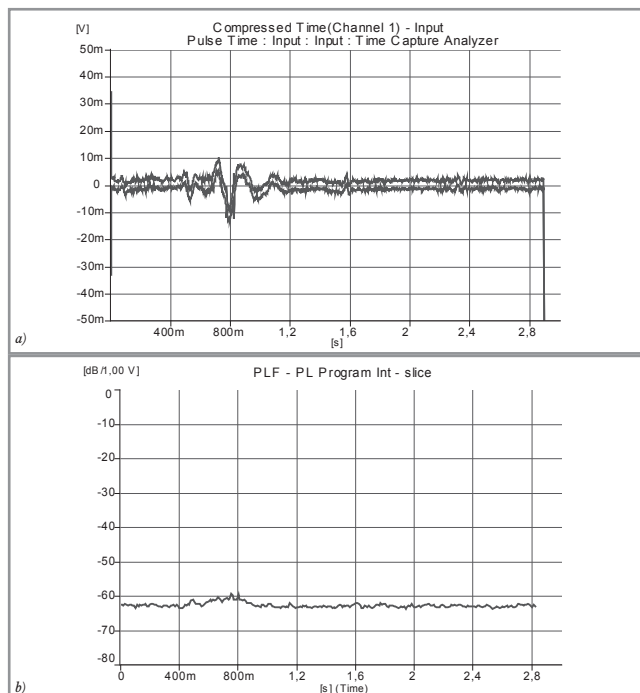
Rys. 7 Przebieg czasowy po filtracji (a) i wyniki całkowania przefiltrowanych sygnałów drgań dla incydentów chrząkania (b)

Wykonane operacje na sygnałach drgań wyróżniają sygnały kaszlu od pozostałych zdarzeń – amplituda całkowanych sygnałów kaszlu jest o co najmniej kilkanaście dB wyższa. Filtrowanie sygnałów drgań, a następnie ich całkowanie w dziedzinie częstotliwości umożliwia wyselekcjonowanie zdarzeń kaszlu. Prawdopodobieństwo detekcji zdarzeń kaszlu w badanej grupie 12 chorych wynosiło nie mniej niż 80%.

### Podsumowanie

Wykonane badania miały charakter pilotażowy i ich celem było określenie charakterystycznych cech (wibroakustycznych), które wyróżniają kaszel od innych zdarzeń typu: krzyk, chrząknięcia, mowa, śmiech, pod kątem opracowania wstępnych założeń dla automatycznego analizatora kaszlu. Z wykonanych pomiarów wynika, że sygnały wibroakustyczne rejestrowane w czasie kaszlu mają znacząco inny charakter niż sygnały, których źródłem są pozostałe zdarzenia – przede wszystkim są szersze. W przypadku kaszlu wyższe poziomy składowy spektrum występują powyżej częstotliwości 8 kHz. Z tego względu wykonano filtrowanie sygnałów, a następnie poddano je całkowaniu w dziedzinie częstotliwości. W wyniku wyżej opisanego przetwarzania sygnałów drgań klatki piersiowej w badanej grupie 12 chorych wykrywano zdarzenia kaszlu z prawdopodobieństwem nie niższym niż 80%. Wyniki badań wykazały istotne różnice w charakterze rejestrowanych zdarzeń, co może być wykorzystane w dalszych pracach nad projektem automatycznego analizatora kaszlu (m.in. rozważanie zależności czasowych i energetycznych porównywalnych sygnałów, kondycjonowanie, uściślenie parametrów analiz).

Wykazano, że sygnały rejestrowane za pomocą przetwornika drgań mają podobne cechy do sygnałów akustycznych. Na podstawie analiz tych sygnałów można uzyskać istotne informacje, pozwalające scharakteryzować badane zdarzenia. Będzie to szczególnie istotne w procesie projektowania architektury docelowego urządzenia, gdyż sugeruje zastosowanie tylko jednego toru pomiarowego, rejestrującego drgania klatki piersiowej monitorowanego pacjenta. Takie rozwiązanie uprości zarówno budowę urządzenia, jak i algorytmy przetwarzania rejestrowanych sygnałów przy zachowaniu dokładności jego pracy.



Rys. 8 Przebieg czasowy po filtracji (a) i wyniki całkowania przefiltrowanych sygnałów drgań dla incydentów krzyku (b)

Kolejnym etapem pracy nad automatycznym analizatorem kaszlu będzie zaimplementowanie dyskryminatora poziomu sygnału, który przy odpowiednim ustawieniu wartości nastaw pozwoli na lepszą ocenę intensywności zdarzeń kaszlu u chorych.

### Literatura

1. J.S. de Cos Escuin, L. M. Sorribes, J.A. Arca: *Clinicoepidemiological multicenter study on lung cancer in Spain*, Arch. Bronconeumol., vol. 42, 2006, s. 446-452.
2. S.J. Barry, A.A. Dane, A.H. Morice, A.D. Walmsley: *The automatic recognition and counting of cough*, Cough, vol. 2(8), 2006.
3. M.A. Coyle, D.B. Keenan, L.S. Henderson, M.L. Watkins, B.K. Haumann, D.W. Mayleben, M.G. Wilson: *Evaluation of an ambulatory system for the quantification of cough frequency in patients with chronic obstructive pulmonary disease*, Cough, vol. 1(3), 2005, published online as doi:10.1186/1745-9974-1-3.
4. N. Ohta, A. Shibuya, H. Ono, S. Kudoh: *New non-invasive automatic cough counting program based on 6 types of classified cough sounds*, Internal Medicine, vol. 45 (6), 2006, s. 391-397.
5. M.J. Doherty, L.J. Wang, S. Donague, M.G. Pearson, P. Downs, S.A.T. Stoneman, J.E. Earis: *The acoustic properties of capsaicin-induced cough in healthy subjects*, Eur Respir J, vol. 10, 1997, s. 202-207.
6. A. Murata, Y. Taniguchi, Y. Hashimoto, Y. Kaneko, Y. Takasaki, S. Kudoh: *Discrimination of productive and non-productive cough by sound analysis*, Internal Medicine, vol. 37(9), 1998, s. 732-735.
7. I.M. Paul, K. Wai, S.J. Jewell, M.L. Shaffer, V.V. Varadan: *Evaluation of a new self-contained, ambulatory, objective cough monitor*, Cough, vol. 2(7), 2006, published online as doi:10.1186/1745-9974-2-7
8. M. Krajnik, I. Damps-Konstańska, M. Grabowski, P. Pozański, E. Jassem: *An evaluation of cough-generated sound and body surface vibration by the MEPIM Vibroacoustic System of Cough Registration (MEPIM VSCR)*, Advances in Palliative Medicine, vol. 7, 2008, s. 3-7.
9. Cz. Cempel: *Wibroakustyka stosowana*, PWN, Warszawa 1989.
10. T.D. Rossing: *Springer handbook of acoustics*, Springer Science + Business Media, New York 2007.
11. F.A. Everest: *Podręcznik akustyki*, Sonia Draga, Katowice 2007.
12. J.A. Smith, J.E. Earis, A.A. Woodcock: *Establishing a gold standard for manual cough counting: video versus digital audio recordings*, Cough, vol. 2(6), 2006, published online as doi:10.1186/1745-9974-2-6

otrzymane / received: 01.08.2009  
zaakceptowane / accepted: 05.10.2009