



Tomografia impedancyjna w diagnostyce i leczeniu noworodka – doświadczenia wstępne

Impedance tomography in the diagnostics and treatment of a newborn – preliminary experience

Adrian Truszkiewicz¹, Łukasz Wojtas², Witold Błaż², Dorota Bartusik-Aebisher³, Katarzyna Nitychoruk², Anna Tomaszek², David Aebisher¹

¹Zakład Fotomedycyny i Chemii Fizycznej, Kolegium Nauk Medycznych, Uniwersytet Rzeszowski, Al. mjr. W. Kopisto 2a, 35-959 Rzeszów, e-mail: atruszkiewicz@ur.edu.pl

²Klinika Noworodków z Pododdziałem Intensywnej Terapii Noworodka, Kliniczny Szpital Wojewódzki nr 2 im. św. Jadwigi Królowej w Rzeszowie, ul. Lwowska 60, 35-301 Rzeszów

³Zakład Biochemii i Chemii Ogólnej, Instytut Nauk Medycznych, Kolegium Nauk Medycznych, Uniwersytet Rzeszowski, ul. Warzywna 1A, 35-310 Rzeszów

Streszczenie

Abstract

Niniejsze opracowanie stanowi wstępny raport z doświadczeń własnych z wykorzystania tomografu impedancyjnego (EIT) w Klinice Noworodków. Urządzenie to pozwala na diagnostykę małych pacjentów bez wykorzystywania kancerogennego promieniowania rentgenowskiego w kierunku opowietrzenia płuc. Dodatkowo pozwala na analizę pracy układu oddychania w czasie niemalże rzeczywistym. Jest to szczególnie ważne w przypadku wcześniaków, gdzie aparat płucny jest jeszcze niewykształcony, a analiza jego działania oparta była do tej pory o analizę przepływów gazów i utlenienia krwi. Wprowadzenie EIT w chwili obecnej nie może wyeliminować w żadnym przypadku wykonywania innych badań, w tym diagnostyki obrazowej, to wydaje się mieć duży potencjał wspomagający diagnostykę najmłodszych pacjentów. Szereg ograniczeń, jakie posiada EIT, ze swoją niską rozdzielczością przestrzenną na czele, plasują obecnie tę technikę na pozycji wspomagającej diagnostykę płuc u wcześniaków i niemowląt. Analiza dostępnej literatury światowej wykazuje, iż badania z wykorzystaniem EIT możliwe są również u pacjentów dorosłych – tutaj technika ta pozwala również na badanie układu oddychania.

Należy stwierdzić, iż EIT jest to technika rozwojowa mająca tę przewagę nad innymi metodami badań, iż ma zdolność uwidaczniania badanych struktur w czasie rzeczywistym.

Słowa kluczowe: tomografia impedancyjna, tomografia komputerowa

The study is a preliminary report on the experience with the use of impedance tomography (EIT) in the Newborn Clinic. This device allows to monitor lung aeration of little patients without the use of carcinogenic X-rays. In addition, it allows to analyze the work of the respiratory system in virtually real time. This is especially important in the case of premature babies, where the lungs are still underdeveloped and the analysis of their operation has so far been based on the analysis of gas flows and blood oxygenation. Although, at present time, the EIT cannot in any case eliminate other tests, including imaging diagnostics, it seems to have a great potential to support diagnostics of the youngest patients. A number of limitations of EIT, with its low spatial resolution at the fore, place this technique in the position supporting lung diagnostics of premature babies and infants. The analysis of the available world literature shows that the treatment with the use of EIT is also possible in case of adult patients – here this technique allows to examine the respiratory system.

It should be stated that EIT is a development technique which has the advantage over other research methods because it has the ability to visualize the examined structures in real time.

Key words: impedance tomography, computed tomography

otrzymano / received:

29.08.2022

poprawiono / corrected:

05.09.2022

zaakceptowano / accepted:

12.09.2022



Wprowadzenie

Tomografia jest narzędziem znajdującym zastosowanie w bardzo wielu dziedzinach życia. Jest badaniem nieniszczącym – pozwalającym zobrazować wnętrze obiektu na podstawie pomiarów zewnętrznych. W naszej codzienności zwykło się przyjmować, iż tomografia komputerowa (KT) to technika związana z obrazowaniem ludzkiego ciała – wykorzystująca promieniowanie rentgenowskie. I choć jest to niewątpliwie prawdą, to obrazowanie medyczne nie jest jedynym zastosowaniem tomografii komputerowej.

Cel pracy

Celem pracy jest prezentacja doświadczeń wstępnych w stosowaniu diagnostyki EIT. Celem niniejszego opracowania jest przybliżenie metody tomografii impedancyjnej jako takiej, która pozwala na prezentację badanego obszaru oraz może wspomóc leczenie w tym przypadku najmniejszych, a zarazem najbardziej wymagających pacjentów.

Praca ta nie jest przedstawieniem samej metody tomografii impedancyjnej, gdyż ta jest bardzo obszerna i wymaga oddzielnego opracowania, ale jest prezentacją jej zastosowania w jednym z najbardziej newralgicznych miejsc szpitala. Niniejsza praca nie jest również pracą, której zadaniem byłoby zaprezentowanie pełnych możliwości systemu z uwagi na to, że nie jest to funkcją przynależną autorom.

Zarys metody i jej zastosowania

Zadaniem każdej tomografii jest dostarczenie informacji o wnętrzu badanego obiektu na podstawie zewnętrznych obserwacji. W metodzie tej obraz jest odzwierciedleniem rozkładu gęstości reprezentującej rozpatrywaną właściwość fizyczną badanego ciała. Tomografia impedancyjna to ogólna nazwa metody wykorzystującej jako nośnik informacji prąd elektryczny. Możliwym jest obrazowanie konduktywności, przenikalności elektrycznej, jak również zjawisk związanych z polem magnetycznym.

Innymi rodzajami systemów obrazowania, które należy zakwalifikować do metod tomograficznych, a znajdujących zastosowanie w medycynie, to rezonans magnetyczny (MR), pozytonowa tomografia (PET), tomografia emisyjna pojedynczych fotonów (SPECT), koherencyjna tomografia optyczna (OCT) czy też impedancyjna tomografia komputerowa (EIT). Obrazy tomograficzne można również otrzymać, wykorzystując ultradźwięki. Nieoceniony wkład w badania przemysłowe ma również mikrotomografia (CMT). Metoda ta jest bardzo podobna do klasycznego KT, wykorzystująca również promieniowania rentgenowskie i pozwala na uwidacznianie drobnych badanych struktur przy rozmiarze woksela na poziomie mikrometrów. Po drugiej stronie skali wielkości fizycznych w astrofizyce wykorzystuje się obrazowanie Zeemana-Doplera. Pozwala ono badać pola magnetyczne gwiazd [7]. W geofizyce wykorzystuje się fale sejsmiczne do tomografii sejsmicznej [8].

Sama tomografia impedancyjna ma szereg zastosowań w technice. Wykorzystuje się ją do poszukiwania złóż bogactw naturalnych. Technika tą posługują się również archeolodzy do poszukiwania anomalii w badanych obszarach gruntu. W wojskowości trwają prace nad wykorzystaniem EIT do wykrywania min przeciwpiechotnych [9]. Przy pomocy tej techniki możliwym jest badanie struktury pnia drzewa [10]. W tomografii procesowej możliwym jest badanie przepływów substancji czy też nadzór nad różnymi procesami. W budownictwie możliwym jest stosowanie EIT do oceny zawilgocenia murów [11].

Historycznie rzecz ujmując, EIT w zastosowaniach mających związek z medycyną to przetom lat 70. i 80. XX w. Wówczas to powstały jedne z pierwszych obrazów klatki piersiowej wykorzystujących pomiary impedancji [12]. Uzyskany wówczas obraz był prezentacją izoadmitancyjną mapy klatki piersiowej człowieka. Praca [13] ukazała już przekrój przedramienia człowieka, co było przetomem i dużo bardziej koresponduje z dzisiejszym rozumieniem pojęcia tomografii. Dzisiaj EIT obejmuje badania i monitorowanie płuc, serca, żołądka, mózgu czy też kończyn.

Niniejsze opracowanie jest krótką charakterystyką stosunkowo szybko rozwijającej się dziedziny tomografii, a mianowicie tomografii impedancyjnej. Znajduje ona zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, a od niedawna również coraz częściej można z niej korzystać w medycynie. Jest ona nieinwazyjną metodą diagnostyczną, która umożliwia prowadzenie badania pacjenta przy łóżku chorego. Niewątpliwą zaletą jest brak promieniowania rentgenowskiego. Ma to istotne znaczenie w prowadzeniu diagnostyki, szczególnie w przypadkach dzieci i noworodków. U podstaw tworzenia obrazu w EIT leżą zmiany impedancji w obszarze klatki piersiowej w czasie oddychania. Przewodność różnych tkanek różni się, a zmiany stanu tkanki powodują dodatkowe mierzalne różnice. To właśnie one są podstawą obrazowania impedancji elektrycznej. W obrazowaniu tkanek nie stosuje się układów, których działanie oparte jest o prąd stały. Jest to związane ze zjawiskami, jakie zachodzą w obszarze styku elektrody z tkanką oraz przepływem prądu stałego przez tkankę. Należy dodać, iż prąd stały jest stosowany z dużym powodzeniem w elektroterapii. W tabeli 1 przedstawiono wybrane parametry tkanek ludzkich.

Tabela 1 Parametry tkanek i narządów ludzkich z zakresu częstotliwości (20-100 kHz)

Rodzaj tkanki biologicznej	Oporność [Ω m]
Kość	166
Tłuszcz	21-28
Płuco	7.3-24
Płyn mózgowo-rdzeniowy	6.8
Istota szara mózgu	2.8
Istota biała mózgu	6.8
Wątroba	3.5-5.5
Krew	1.5
Osocze	0.66
Tkanka nerwowa	5.8

Źródło: [4].



Analizując doniesienia literaturowe, można zauważyć ciągłe zwiększanie się liczby publikacji w tym zakresie, co świadczy o zwiększaniu się liczby zastosowań tej metody diagnostycznej. W pracy [1] badacze dokonali opisu przypadku pacjenta z zatorowością płucną, w którym to badanie EIT dostarczyło informacji dodatkowych, pozwalających na postawienie diagnozy oraz podjęcie decyzji w kontekście problemów terapeutycznych. Autorzy publikacji zwracają uwagę, iż metoda EIT jest wolna od niebezpieczeństwa powikłań nefropatii pokontrastowej związanej z badaniem KT, co może w przypadku osób z ostrymi lub przewlekłymi chorobami nerek mieć zasadnicze znaczenie. Jednocześnie mówią o niemożności lekceważenia wad tej metody, a mianowicie jej niskiej rozdzielczości przestrzennej oraz braku dokładnej lokalizacji małych zatorów w kontekście zatorowości płucnej. Powoduje to, iż EIT nie może być stosowane jako jedyna metoda diagnostyczna, lecz jako metoda wspomagająca w kontekście tego schorzenia.

Zastosowanie metody EIT w oddziale neonatologicznym pozwala na ciągłe monitorowanie płuc noworodka, dostarczając personelowi lekarsko-pielęgniarskiemu cennych informacji o ich upowietrzeniu. Duży odsetek noworodków cierpi na zespół niewydolności oddechowej (RDS), co jest konsekwencją niedojrzałości płuc. Dla dzieci urodzonych przed 25. tygodniem ciąży to schorzenie występuje w 99% przypadków i odsetek ten maleje wraz ze wzrostem liczby tygodni ciąży, w którym następuje poród. Leczenie małych pacjentów oparte jest o wentylację mechaniczną, jednakże taka metoda może mieć konsekwencje w postaci nawet uszkodzeń tkanki płucnej. EIT zapewnia nieinwazyjną i względnie bezpieczną metodę diagnostyczną. Może ona być uzupełnieniem silnie obciążających promieniowaniem rentgenowskim badań KT. Jej niezaprzeczalna zaleta, jaką jest możliwość stosowania przy inkubatorze w połączeniu z obrazowaniem w czasie rzeczywistym, powoduje, iż lekarz może na bieżąco obserwować stan upowietrzenia płuc.

W pracy [5] autorzy zaprezentowali przypadek niemowlęcia z zespołem ostrej niewydolności oddechowej, które monitorowane było przy pomocy systemu EIT. Zdiagnozowali oni przy pomocy tej metody diagnostycznej postępującą zapaść oddechową. Metoda obrazowania płuc, jaką jest EIT, została wykorzystana do monitorowania zmian w płucach 16-letniej pacjentki z chorobą Tay-Sachsa, której przypadek został opisany w pracy [6]. Autorzy pokazali tam zastosowanie tomografii impedancyjnej do oceny postępów terapeutycznych wykorzystujących mechaniczną terapię insuflacyjno-eksuflacyjną (MI-E). Jest to terapia wspomagana kaszlem powodująca lepszą wymianę powietrzną w płucach. W części dyskusyjnej pracy autorzy pozytywnie oceniają możliwość stosowania EIT do oceny zapadnięcia się pęcherzyków płucnych i zmiany FRC u krytycznych pacjentów z chorobą płuc.

Analizę zastosowań oraz trendy w EIT zostały zebrane i opracowane w bibliometrycznej publikacji przez autorów pracy [2]. Opierając się na publikacjach z lat 2001-2021, zidentyfikowali 1068 przydatnych do zamierzonego zadania publikacji, z czego

do końcowej analizy złączyli 636 pozycji literaturowych. Przejrząc instytucji, z których pochodzą publikacje pokazała, iż metoda ta najczęściej jest stosowana w jednostkach uniwersyteckich. Można z tego wysnuć wnioski, iż EIT nie jest jeszcze szeroko rozpowszechnione wśród środowiska medycznego w porównaniu oczywiście z innymi metodami obrazowania. Poddane opisowi publikacje miały związek z monitorowaniem i wentylacją płuc. Analizując obszary zastosowań EIT w ostatnich latach widać, iż może być wykorzystywana na różnych polach – z przeprowadzonej w przywołanym artykule analizy wynika, iż może ona być pomocna w przypadku badań nad otyłością i mieć zastosowanie przy znieczuleniu ogólnym, natlenieniu pozaustrojowym, jak również perfuzji płuc. Przywołana praca wydaje się być doskonałą dla Szanownego Czytelnika chcącego zgłębić zastosowanie EIT w medycynie, a w szczególności w diagnostyce układu oddychania, gdyż zebrane informacje zostały rzetelnie opracowane zarówno statystycznie, jak i graficznie.

Pewnym odmiennym zastosowaniem EIT, które to nie mogło jeszcze znaleźć się w pracy [3] z uwagi na późniejsze powstanie pracy, jest zastosowanie tomografii impedancyjnej do badania mózgowia. Autorzy przeprowadzili eksperyment z wykorzystaniem szczurów, a metodę wykorzystali do obrazowania padaczki, krwotoku mózgowego i stanu niedokrwienia. Ponadto metoda została wykorzystana do próby oceny zmian zawartości wody w mózgowiu, co było związane z obrzękiem mózgu. W odniesieniu do chorób o podłożu naczyniowym, EIT może być stosowanym ciągle i przy łóżku chorego uzupełnieniem ugruntowanych już metod diagnostycznych, takich jak KT czy też MR. We wnioskach zwrócili oni uwagę na konieczność poprawy kwestii związanej z elektrodami oraz impedancją kontaktową czaszki i skóry. W celu poprawy obrazowania konieczna jest poprawa modelowania oraz kompleksowe uwzględnienie wielu czynników, takich jak geometria, niejednorodność czy też budowa czaszki. Dodatkowo koniecznym jest dostosowanie algorytmów analizy danych pod kątem różnych chorób. W podsumowaniu powiedzieli oni, iż uznanie EIT za dojrzałą i rutynową technikę diagnostyczną wymaga gromadzenia danych dla różnych jednostek chorobowych.

Opisy przypadków

Opracowanie to jest raportem wstępnym z diagnostyki wykorzystującej system Enlight 2100, produkcji Timpel (Sao Paulo, Brazylia). Jest to system pracujący przy częstotliwości 125 kHz. Częstotliwość wyświetlania klatek, a więc rozdzielczość czasowa obrazowania wynosi 50 obr./s przy rozdzielczości przestrzennej 32 x 32 piksele. Urządzenie to pozwala uzyskać globalny i regionalny pletyzmogram wskazujący regionalną objętość oddechową. Dodatkowo system wyświetla wykresy wentylacji i parametry, w tym automatyczną kalkulację w czasie rzeczywistym Driving Pressure. Będący przedmiotem oceny aparat EIT może być stosowany zarówno dla noworodków, dzieci, jak i osób dorosłych. W przypadku noworodków system EIT używa do

obrazowania pasów z 16 elektrodami, natomiast dla dzieci i dorosłych możliwym jest stosowanie obwodów 32-elektrodowych. Pasy należy dobierać w zależności od obwodu klatki piersiowej i tak: w przypadku pasów noworodkowych zakres obwodu klatki piersiowej zawiera się w granicach od 21,5 cm do 37,4 cm – 6 długości pasów, natomiast dla pozostałych grup wiekowych przedział obejmuje zakresy od 37,5 cm do 134 cm – 11 długości pasów. Użytkowanie ułatwia detekcja w czasie rzeczywistym niedziałających elektrod oraz detekcja artefaktów wynikających z ruchu pacjenta. 48-godzinne trendy pozwalają na analizę retrospektywną stanu pacjenta w kontekście badania EIT.

Zainstalowany w Klinice Noworodków służy prowadzeniu monitoringu pacjentów z zaburzeniami oddychania. Rycina 1a) prezentuje wygląd samego urządzenia, natomiast rycina 1b) prezentuje pacjentów z układem elektrod służących obrazowaniu tomograficznemu.

Poniższe obrazy prezentują wybrane raporty z systemu Enlight 2100. Ryciny 2 i 3 stanowią kompilację czterech obrazów – wybranych z tych, które zostały zarejestrowane w systemie w czasie akwizycji. Kolorami oznaczono upowietrzenie płuc. Kolor niebieski odpowiada powierzchni płuc. Im upowietrzenie jest intensywniejsze, tym kolor na tychże rycinach staje się jaśniejszy. Na rycinie 4 zaprezentowano krzywe pletyzmograficzne dla poszczególnych rejonów klatki piersiowej, jak również wykres zbiorczy. W tym przypadku klatka piersiowa została podzielona wirtualnie na cztery rejony odpowiednio oznaczone na wykresach. Należy dodać, iż są możliwe inne podziały badanego obszaru.



Ryc. 1a) Wygląd systemu Enlight 2100, prod. Timpel (Sao Paulo, Brazylia), **b)** mali pacjenci z układem elektrod akwizycyjnych. Fotografie i badania EIT wykonane były w różnych okresach hospitalizacji
Źródło: Opracowanie własne.

Opis pierwszego przypadku

Wcześniejak płci żeńskiej z ekstremalnie niską urodzeniową masą ciała (990 g), urodzony w 28 tygodniu ciąży drogą cięcia cesarskiego w stanie ogólnym średnim – ocenianym na 7/8/8/8 pkt w skali Apgar.

Po porodzie stosowano nieinwazyjne wsparcie oddechowe w trybie nCPAP/BiPhasic, w związku z rosnącym zapotrzebowaniem na tlen (>30%) podano 200mg/kg surfaktantu uzyskując poprawę.

W kolejnych dobach hospitalizacji kontynuowano nieinwazyjne wsparcie oddechowe w trybie NIPPV, następnie z uwagi na utrzymujący się wysięk oddechowy prowadzono wentylację NIV NAVA, a od 45 doby życia wysokoprzepływową terapię donosową ze stopniowo zmniejszonym przepływem.

W dniu badania dziecko pozostawało w stanie średnim, na wysokoprzepływową terapię donosową, parametry: 4 l/min, 25% tlenu.

W USG płuc widoczne cechy dysplazji oskrzelowo-płucnej.

Obrazy przedstawione na rycinie wykazują asymetrię upowietrzenia płuc, co sugeruje konieczność zmiany ułożenia pacjenta. Jest to zgodne z zasadami pielęgnacji dziecka wymagającego wsparcia oddechowego.

Opis przypadku drugiego

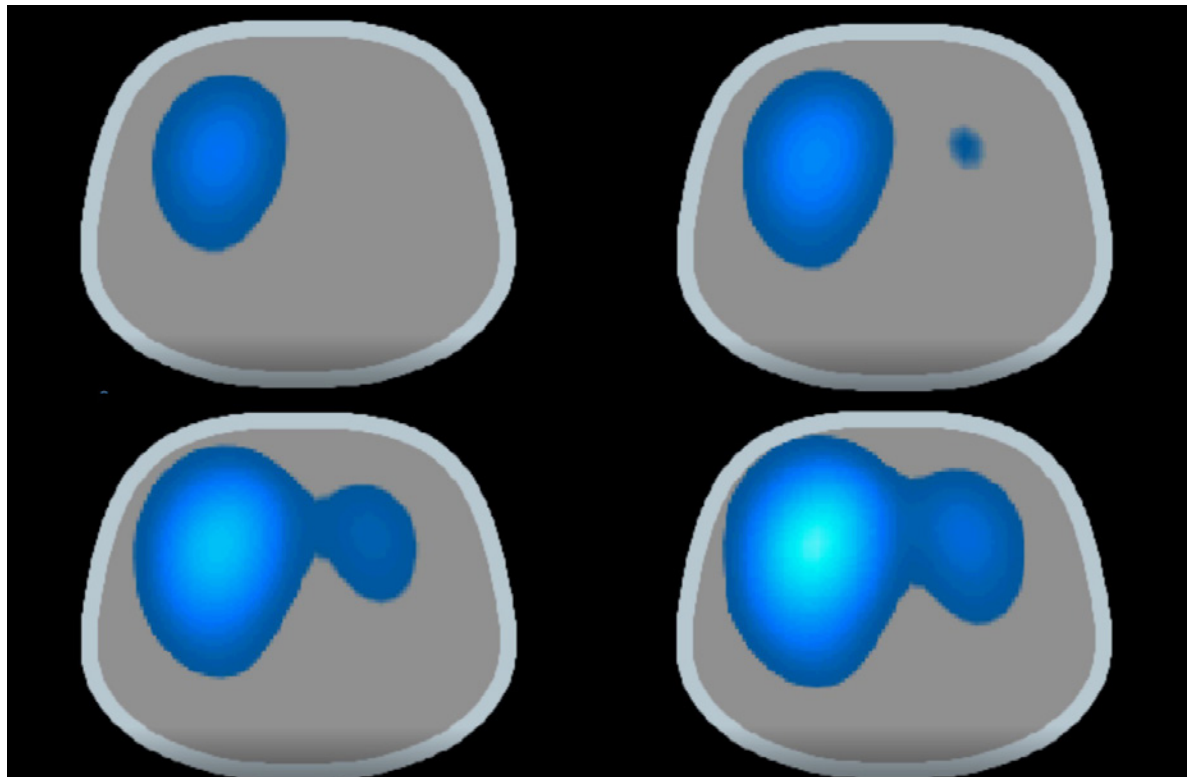
Wcześniejak płci żeńskiej z ekstremalnie niską urodzeniową masą ciała (990 g), urodzony w 25 t.c. siłami natury w stanie ogólnym średnim oceniony na 5/6/6/7 punktów w skali Apgar.

Po porodzie podłączono nieinwazyjne wsparcie oddechowe w trybie NIPPV, podano 200 mg/kg surfaktantu.

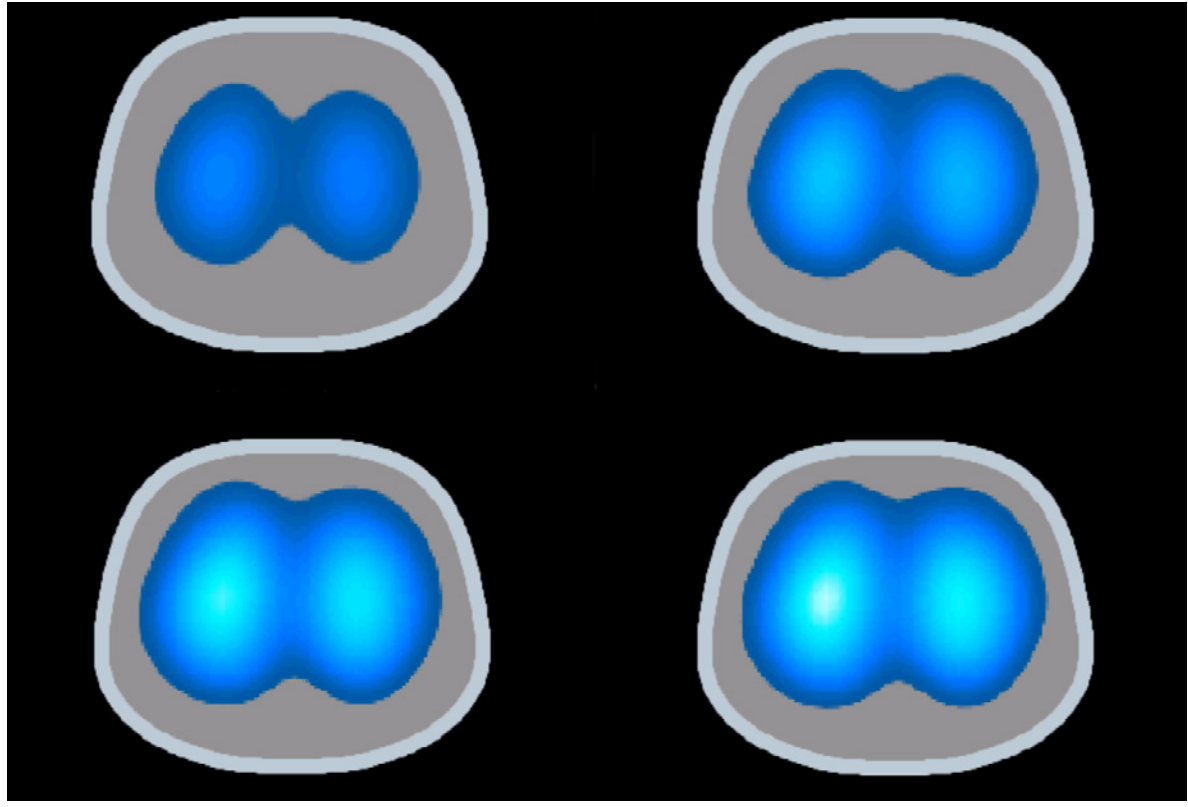
W kolejnym okresie hospitalizacji prowadzono wentylację nieinwazyjną (NIPPV, NIV NAVA, HFNC). W związku z pogorszeniem stanu ogólnego w przebiegu ZOMR oraz w okresie okołozabiegowym po laserokoagulacji dziewczynkę wentylowano mechanicznie w trybie objętościowym.

W dniu badania dziewczynka wymagała wentylacji mechanicznej w trybie z gwarantowaną objętością (PRVC) 4,8 ml/kg, 35% tlenu.

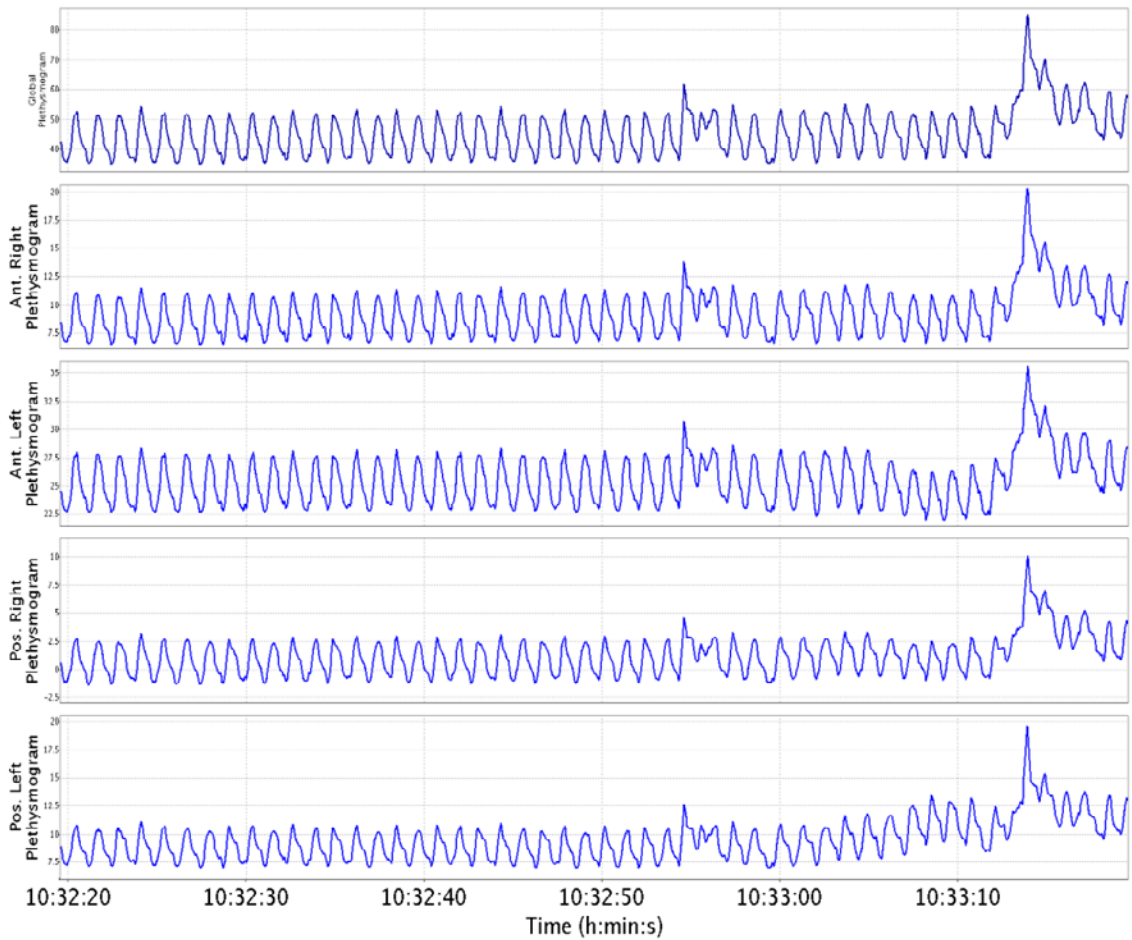
Na rycinie 5 przedstawiono wybrany raport z wentylacji płuc z zaznaczonymi obszarami i odpowiadającymi im wartościami procentowymi. Należy dodać, iż pokazane tutaj przykłady raportów to tylko niektóre z możliwych do uzyskania w systemie Enlight 2100. Raport nie pochodzi z badania pacjentów opisanych jak przypadek pierwszy i drugi, a autorzy zdecydowali się go włączyć do opracowania w celu poglądowym.



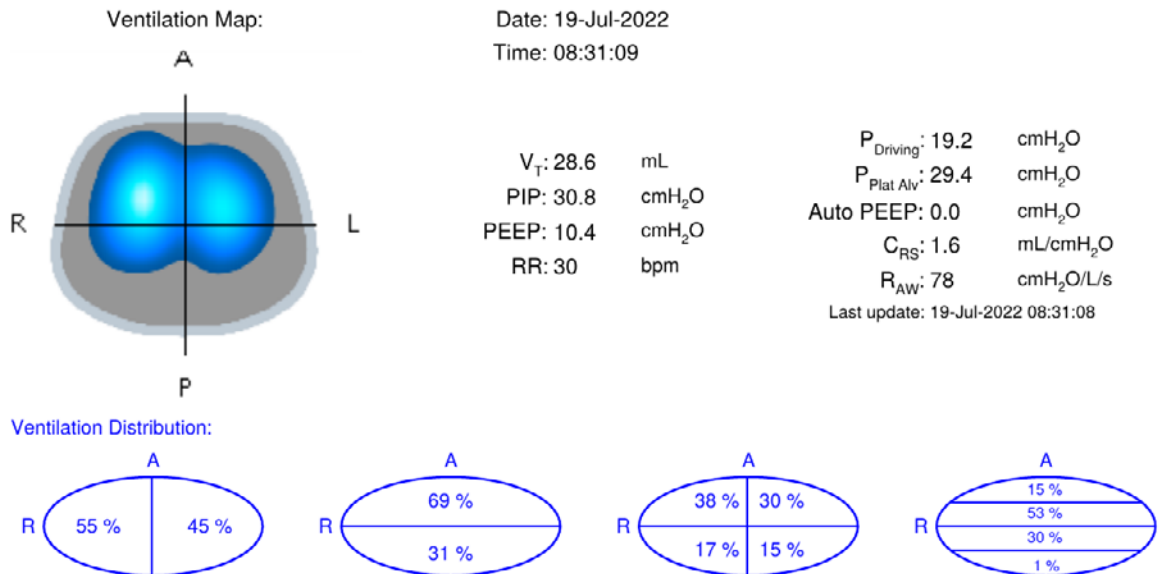
Ryc. 2 Wybrane przekroje przestrzeni badanej pacjenta pierwszego
Źródło: Opracowanie własne.



Ryc. 3 Wybrane przekroje przestrzeni badanej pacjenta drugiego
Źródło: Opracowanie własne.



Ryc. 4 Krzywe pletyzmograficzne płuc pacjenta drugiego
Źródło: Opracowanie własne.




Ryc. 5 Przykład raportu rozkładu wentylacji płuc
Źródło: Opracowanie własne.



Wnioski

Tomografia impedancyjna w obecnej dobie nie może równać się rozdzielczością z żadną inną metodą diagnostyczną znajdującą się w arsenale lekarzy radiologów. Jest to jej podstawowa wada i jak na razie bardzo trudna do wyeliminowania. Niewątpliwą zaletą jest jej względna nieszkodliwość w porównaniu z KT, ale należy mieć na uwadze, że występuje tutaj niewielki przepływ prądu elektrycznego. Ważnym czynnikiem przemawiającym za stosowaniem jej u pacjentów jest fakt, iż możliwym jest prowadzenie badań obrazujących narządy bezpośrednio przy łóżku chorego. Obrazowanie w czasie rzeczywistym badanych narządów może dać lekarzowi dodatkowe informacje o stanie pacjenta, których zdobycie wiązałoby się z prowadzeniem diagnostyki poza oddziałem, a co za tym idzie – wiązałoby się często z odłączeniem pacjenta od urządzeń monitorujących i transportem do innej części szpitala. Obecnie EIT nie jest w stanie wyeliminować innych rodzajów diagnostyki – jest natomiast w stanie pełnić rolę diagnostyki uzupełniającej.

Technika ta ciągle się rozwija i należy żywić nadzieję, że w przyszłości będzie pozyskiwać swoimi zastosowaniami kolejne obszary ludzkiego ciała, eliminując przy tym istniejące ograniczenia. Potrzebne są dalsze badania nad możliwymi zastosowaniami EIT. 

Użyte skróty wykorzystane w medycznym opisie przypadków

ZOMR	– zapalenie opon mózgowo-rdzeniowych,
NIV NAVA	– nieinwazyjna wentylacja sterowana neuronalnie,
HFNC	– wysokoprętywowa terapia donosowa.

Piśmiennictwo

1. X. Wang, H. Zhao, N. Cui: *The Role of Electrical Impedance Tomography for Management of High-Risk Pulmonary Embolism in a Postoperative Patient*, Front Med (Lausanne), 8, 2021, 773471, doi: 10.3389/fmed.2021.773471. PMID: 34869492; PMCID: PMC8639861.
2. Z. Li, S. Qin, C. Chen, S. Mei, Y. Yao, Z. Zhao, W. Li, Y. Deng, Y. Gao: *Emerging Trends and Hot Spots of Electrical Impedance Tomography Applications in Clinical Lung Monitoring*, Front Med (Lausanne), 8, 2022, 813640, doi: 10.3389/fmed.2021.813640. PMID: 35174185; PMCID: PMC8841839.
3. X.Y. Ke, W. Hou, Q. Huang, X. Hou, X.Y. Bao, W.X. Kong, C.X. Li, Y.Q. Qiu, S.Y. Hu, L.H. Dong: *Advances in electrical impedance tomography-based brain imaging*, Mil Med Res., 9(1), 2022, 10, doi: 10.1186/s40779-022-00370-7. PMID: 35227324; PMCID: PMC8883715.
4. Y. Shi, Z. Yang, F. Xie, S. Ren, S. Xu: *The Research Progress of Electrical Impedance Tomography for Lung Monitoring*, Front Bioeng Biotechnol., 9, 2021, 726652, doi: 10.3389/fbioe.2021.726652. PMID: 34660553; PMCID: PMC8517404.
5. F.S. Rossi, E.L.V. Costa, D.D.M. Iope, P.H.D. Pacce, C. Cestaro, L.Z. Braz, A. Bousso, M.B.P. Amato: *Pendelluft Detection Using Electrical Impedance Tomography in an Infant. Keep Those Images in Mind*, Am J Respir Crit Care Med., 200(11), 2019, 1427-1429, doi: 10.1164/rccm.201902-0461IM. PMID: 31260637.
6. M.S. Nascimento, F.S. Rossi, C.F. Panonko, L.C. Correa, M. Amato, C.M. Rebello, C. do Prado: *Mechanical Insufflator-Exsufflator Maneuver No Collapse, So Says Electrical Impedance Tomography*, Acad J Ped Neonatol, 9(4), 2020, 555824, doi: 10.19080/AJPN.2020.09.555824.
7. F. Euchner, S. Jordan, K. Beuermann, B.T. Gansicke, F.V. Hessman: *Zeeman tomography of magnetic white dwarfs*, A&A, 390, 2002, 633-647, doi: 10.1051/0004-6361:20020726.
8. W. Dębski, Ł. Rudziński: *Pasywna tomografia sejsmiczna obszaru Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*, w: W.M. Zuberek, K. Jochymczyk (red.): *Geneza i charakterystyka zagrożenia sejsmicznego w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym*, Katowice, Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, 2010, 80-87.
9. A. Bujnowski: *Różnicowa tomografia impedancyjna*, PWNT, Gdańsk, 2009.
10. S. Filipowicz, T. Rymarczyk: *Zastosowanie tomografii impedancyjnej do badania stanu pni drzew*, In XX Sympozjum PTZE, 2010, 45-46.
11. S.F. Filipowicz, K. Nita: *Porównanie wielokanatowych układów pomiarowych w tomografii impedancyjnej*, Prace Instytutu Elektrotechniki, 230, 2007, 65-79.
12. R.P. Henderson, J.G. Webster: *An Impedance Camera for Spatially Specific Measurements of the Thorax*, in IEEE Transactions on Biomedical Engineering, BME-25(3), 1978, 250-254, doi: 10.1109/TBME.1978.326329.