

Krystian SZYMCZAK\*  
Anna CYSEWSKA-SOBUSIAK\*

## ZASTOSOWANIE ULTRADŹWIĘKÓW W INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ

W artykule omówiono wybrane zagadnienia dotyczące wykorzystania fal ultradźwiękowych w inżynierii biomedycznej. W wielu przypadkach ultrasonografia jest jedyną możliwą do zastosowania metodą obrazowania, a nowoczesne ultrasonografy są złożonymi urządzeniami sterowanymi komputerowo. W pierwszej części pracy opisano wybrane zastosowania ultrasonografii w położnictwie. Wykorzystanie efektu przesunięcia dopplerowskiego umożliwia wykrycie ruchu narządu odbijającego wiązkę ultradźwięków i może zostać użyte do nieinwazyjnego wykrywania uderzeń serca płodu. Przedstawiono różne rodzaje prezentacji pozyskiwanych danych. W drugiej części pracy skupiono się na dezintegracji kamieni nerkowych za pomocą ultradźwiękowych fal uderzeniowych. Omówiono problematykę jednoczesnego generowania i ogniskowania fal ultradźwiękowych oraz precyzyjnej lokalizacji kamieni nerkowych. Poruszono również kwestię bezpiecznego stosowania ultradźwięków na potrzeby diagnostyki medycznej, skupiając się na środkach ochrony przed szkodliwym wpływem „hałasu” ultradźwiękowego i na bezpieczeństwie badań ultradźwiękowych.

SŁOWA KLUCZOWE: inżynieria biomedyczna, ultradźwięki, ultrasonografia, litotrypsja

### 1. ZASTOSOWANIE ULTRASONOGRAFII W GINEKOLOGII I POŁOŻNICTWIE

#### 1.1. Wstęp

Ocena stanu płodu odgrywa istotną rolę we współczesnym położnictwie [2 – 4]. Celem monitorowania jest upewnienie się, że wszystkie narządy płodu są prawidłowo ukrwione i utlenowane, tak aby procesy metaboliczne mogły przebiegać w sposób prawidłowy. Spośród różnych technik rejestracji czynności serca płodu najczęściej stosowana jest pośrednia nieinwazyjna metoda dopplerowska. Wyznaczenie chwilowej częstości uderzeń serca płodu polega na rejestracji skurczów i rozkurczów serca, na podstawie analizy efektu przesunięcia dopplerowskiego wiązki ultradźwiękowej odbitej od poruszających się zastawek lub ścian serca płodu. Współczesne ultrasonografy umożliwiają obliczanie widm sygnałów dopplerowskich, co pozwala na zobrazowanie rozkładów prędkości

---

\* Politechnika Poznańska.

przepływów krwi w naczyniach [3, 4]. Nieprawidłowy przepływ krwi w badaniu dopplerowskim jest bardzo ważnym sygnałem do intensywnego monitorowania płodu i przebiegu ciąży.

## 1.2. Tor pomiarowy

Badanie dopplerowskie jest badaniem ultrasonograficznym pozwalającym na ocenę przepływów w krążeniu maciczno-łożyskowym. Dzięki badaniu dopplerowskiemu można ocenić ukrwienie poszczególnych struktur płodu oraz zbadać przepływy w małych naczyniach niewidocznych podczas standardowego USG. Wykorzystując efekt przesunięcia dopplerowskiego, możliwe jest wykrycie ruchu narządu odbijającego wiązkę ultradźwięków. Fala ultradźwiękowa dość łatwo przenika przez tkankę miękką, a część tej fali odbija się od powierzchni, gdzie skokowo zmienia się impedancja akustyczna tkanki, np. na styku dwóch różnych organów. Jeśli łącznie tkanek jest w ruchu względem źródła fal ultradźwiękowych, to częstotliwość odbitego sygnału będzie przesunięta względem pierwotnego sygnału zgodnie z efektem Dopplera. Dzięki temu zjawisku możliwe jest wykrywanie uderzeń serca płodu. Fale ultradźwiękowe są generowane w przetworniku sprzężonym akustycznie z powierzchnią brzucha matki dzięki zastosowaniu odpowiedniego żelu. Najczęściej stosuje się wiązkę ultradźwiękową w zakresie częstotliwości (1–2) MHz, gdyż fala wnika na tyle głęboko, aby w wystarczającym stopniu objąć płód.

Fala ultradźwiękowa zostaje częściowo odbita od różnych powierzchni rozdzielających dwa ośrodki płodu: serce i krew. Dotyczy to szczególnie płatków zastawki. W tym przypadku, w niektórych fazach cyklu serca występują stosunkowo duże wartości prędkości ruchu. Wówczas wiązka ultradźwiękowa, odbita na granicy zastawka – krew, ma częstotliwość znacznie zmienioną. Zmiana częstotliwości jest związana z prędkością odbijającej powierzchni, dzięki czemu możliwy do wykrycia jest każdy cykl uderzenia serca.

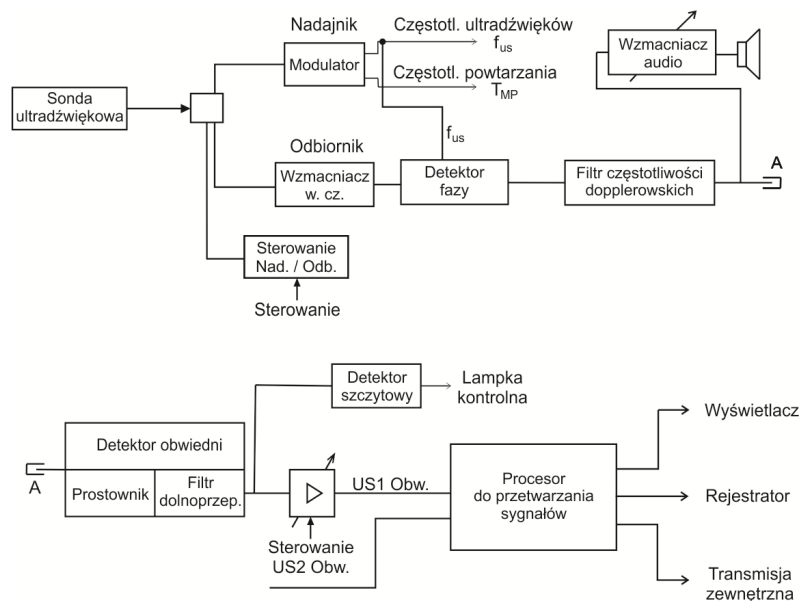
Kardiotokografia jest jedną z głównych metod oceny stanu płodu, kontrolując czynności serca płodu na tle aktywności skurczowej macicy [2, 4]. Podstawowe składowe toru do ultradźwiękowej rejestracji czynności serca płodu w klasycznym kardiotokografie przedstawiono na rys. 1.

## 1.3. Obrazowanie ultrasonograficzne

W zależności od rodzaju badania stosuje się różne rodzaje prezentacji danych ultradźwiękowych: prezentację typu A (Amplitude), typu B (Brightness) i typu M (Motion) [3]:

- Prezentacja typu A – jest to najstarszy i najprostszy sposób prezentacji danych ultradźwiękowych, który polega na wyświetlaniu chwilowych wartości

odbieranego sygnału USG w funkcji czasu. Do uzyskania obrazów w prezentacji A wystarczy głowica USG z pojedynczym przetwornikiem piezoelektrycznym, nadająca impuls pobudzający i odbierająca echa powstające w badanym ośrodku. Ten sposób prezentacji danych stosowany jest do tej pory w okulistyce. Umożliwia on łatwą ocenę struktur oka, w tym np. stwierdzenie odklejenia się siatkówki.



Rys. 1. Schemat toru pomiarowego w klasycznym kardiologii [2]

- Prezentacja typu B – polega na wizualizacji dwuwymiarowego przekroju, w której wartość chwilowa odbieranego sygnału moduluje jasność kolejnych punktów obrazu. Obraz generowany jest w ten sposób, że głowica ultradźwiękowa emituje impulsy w postaci wąskiej wiązki w ściśle określonym kierunku. Następnie odbiera z tego kierunku echa, powstające na niejednorodnościach struktur biologicznych. Często charakterystyka kierunkowa odbiorcza jest bardziej ostra i lepiej określona, niż charakterystyka nadawcza. Wypadkowa charakterystyka kierunkowa jest iloczynem charakterystyk nadawczych i odbiorczych. Inaczej mówiąc, sygnał odbierany ze zbioru punktów ośrodka jest iloczynem zbiorów punktów pobudzonych przy nadawaniu i odsłuchanych przy odbiorze. W ten sposób tworzony jest jeden promień akustyczny. Po odsłuchaniu i zapamiętaniu wszystkich ech z tego promienia, głowica ultradźwiękowa emituje kolejny promień. Po zapamiętaniu ech ze wszystkich promieni (w współczesnych aparatach USG jest ich od 100 do 400) aparat wyświetla zapamiętany obraz. Prezentacja typu B jest najczęściej stosowana w diagnostyce USG. Możliwości jej są dodatkowo

zwiększone przez liczne algorytmy pomiarowe. Rysunek 2 przedstawia płód w obrazowaniu typu B [6].

- Prezentacja typu M – nazywana dawniej TM (*Time Motion*), polega na odsłuchu echa z tego samego kierunku w kolejnych momentach. Odebrane echa wyświetlane są w taki sposób jak w prezentacji B, tzn. wartość chwilowa sygnału modeluje jaskrawość wyświetlanych punktów, a kolejne linie są wyświetlane obok siebie, pionowo. Obraz w prezentacji jest przewijany, to znaczy w danym kierunku jest na bieżąco zapisywana i wyświetlana ostatnia linia z prawej strony. Wcześniejsze linie przesuwane są w lewo.



Rys. 2. Ultrasonograficzny obraz płodu w 14-tym tygodniu ciąży wykonany aparatem USG Logiq 200 firmy General Electric [6]

- USG 3D/4D – ten typ obrazowania w porównaniu z prezentacją typu B umożliwia uzyskanie obrazu trójwymiarowego lepszej jakości i o wiele większej rozdzielczości. Obraz uzyskiwany w wyniku badania USG 4D jest dodatkowo rejestrowany w czasie rzeczywistym.

## **2. DEZINTEGRACJA KAMIENI NERKOWYCH ZA POMOCĄ ULTRADŹWIĘKOWYCH FAL UDERZENIOWYCH**

### **2.1. Wstęp**

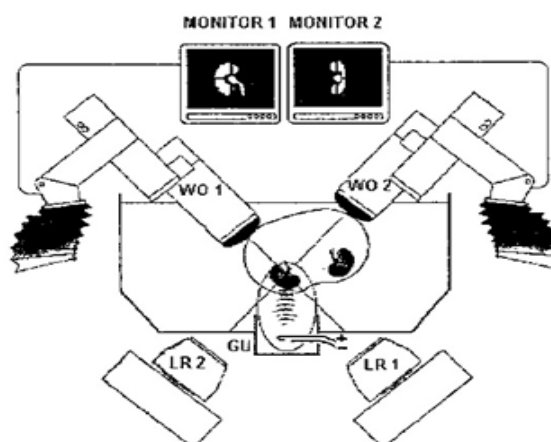
Fala ultradźwiękowa ulega osłabieniu wskutek pochłaniania, rozpraszania i odbicia [1 – 4]. W diagnostyce wykorzystuje się głównie zjawisko odbicia, a w terapii zjawisko pochłaniania. Wpływ ultradźwięków na kamienie moczowe zaczęto badać na początku lat pięćdziesiątych XX wieku, ale przełom w tym zakresie nastąpił pod koniec lat siedemdziesiątych, gdy została opracowana metoda ESWL (*Extracorporeal Shock Wave Lithotripsy*), polegająca na kruszeniu kamieni w sposób najmniej

inwazyjny, za pomocą wysokoenergetycznych fal uderzeniowych generowanych poza ciałem człowieka [2, 4]. W Polsce zainicjowano pierwsze badania nad litotrypsją kamieni nerkowych w roku 1987, a zaowocowały one zbudowaniem w 1989 roku pierwszego eksperymentalnego urządzenia.

W 1988 roku powstało w Polsce pierwsze centrum litotrypsji w klinice Urologii AM w Warszawie, wyposażone w litotryptor Lithostar firmy Simens. W 1995 roku, w tej samej klinice, pomyślne badania przeszedł prototyp litotryptora opracowanego w Zakładzie Ultradźwięków IPPT PAN.

## 2.2. Podstawy fizyczne

Dezintegracja kamieni nerkowych działa na zasadzie wytworzenia wysokiego ciśnienia (do 100 MPa) na kamieniu nerkowym, powodując jego kruszenie się na piasek. Ciśnienie o krótkim czasie trwania i dużej amplitudzie jest wytwarzane w procesie propagacji fal uderzeniowych. Fale uderzeniowe, w przeciwieństwie do fal stosowanych w diagnostyce, tworzą krótkie impulsy o charakterystycznym, nanosekundowym narastaniem czoła impulsu (rys. 3). Fale te wykazują małe tłumienie podczas przechodzenia przez wodę i tkanki miękkie, nie powodując w nich uszkodzeń.



Rys. 3. Lokalizacja i monitorowanie kamienia z zastosowaniem dwóch systemów rentgenowskich w urządzeniu DORNIERA HM-1 [2]; LR- lampy rentgenowskie, WO-wzmacniacze obrazu

Dezintegracja kamieni falami uderzeniowymi spowodowana jest kilkoma zjawiskami mogącymi wystąpić pojedynczo lub jednocześnie:

- Amplituda ciśnienia fali uderzeniowej może od razu przewyższać krótkotrwały opór ciśnieniowy kamienia. Kamień zostaje wówczas zniszczony w wyniku przejścia fali uderzeniowej.

- Fala rozciągająca, która pojawia się wskutek odbicia na tylnej stronie kamienia, prowadzi do kruszenia materiału nawet przy niewielkiej amplitudzie w związku z niską granicą wytrzymałości substancji mineralnych na rozciąganie. Wytrzymałość kamieni nerkowych na ściskanie zawarta jest w granicach (1,92–17,5) MPa, a na rozciąganie (0,08–3,43) MPa.
- Zjawiska kawitacyjne. W trakcie ekspozycji kamienia na impuls fali uderzeniowej, na jego powierzchni i w szczelinach powstają pęcherzyki gazu (kawitacyjne), które zapadając się są źródłami fali uderzeniowej. Powstaje wówczas lokalny wzrost ciśnienia do 10 MPa. Zjawiska te prowadzą do erozji powierzchniowej i mikropęknięć.

### **2.3. Lokalizacja kamieni**

Efektywność procesu dezintegracji kamienia metodą ESWL zależy od precyzji zlokalizowania kamienia w nerce chorego i od pozycjonowania pacjenta tak, aby kruszony kamień znajdował się w ognisku fali uderzeniowej. Na rysunku 3 przedstawiono urządzenie DORNIERA [2], gdzie zastosowano system składający się z dwóch aparatów rentgenowskich monitorujących w czasie rzeczywistym nerkę pacjenta, a obraz obserwowano na dwóch monitorach. Uzyskiwano precyzję lokalizacji kamieni do 1 mm, ale pacjent poddawany był napromieniowaniu przez około 1 godzinę. Lokalizację USG, korzystną z punktu widzenia bezpieczeństwa pacjenta, wprowadzono po raz pierwszy w urządzeniu LT-01 (EDAP). Jednakże tylko około 50% kamieni moczowych można lokalizować tą metodą, gdyż obraz kamienia jest prezentowany w postaci trudnego do interpretacji cienia akustycznego. Doskonalenie techniki RTG, polegające na wprowadzeniu wzmacniaczy obrazu z pamięcią cyfrową i zmniejszenie ekspozycji na promieniowanie, spowodowało obecne lokalizowanie kamieni tą techniką.

Podstawą skutecznej litotrypsji zlokalizowanego kamienia jest jego precyzyjne umieszczenie w ognisku głowicy udarowej i utrzymanie go w tej pozycji podczas kruszenia. Czynności te są realizowane za pomocą specjalnego, sterowanego komputerowo stołu, na którym leży pacjent. W wycięciu blatu takiego stołu znajdują się jedna lub dwie głowice udarowe, osłonięte kołpakami gumowymi i sprzęgnięte akustycznie z ciałem pacjenta warstwą żelu.

## **3. BEZPIECZEŃSTWO STOSOWANIA ULTRADŹWIĘKÓW W DIAGNOSTYCE MEDYCZNEJ**

Jedną z głównych przyczyn, dla których metody ultrasonograficzne stosuje się powszechnie w diagnostyce medycznej, jest przekonanie, że metody te są całkowicie nieszkodliwe dla zdrowia pacjenta. Kilkudziesięcioletnie doświadczenia potwierdzają tezę, że fale ultradźwiękowe o natężeniach

stosowanych w diagnostyce medycznej nie wywołują skutków ubocznych [3, 4]. W rezultacie jedyną powszechnie dostępną metodą obrazowania stosowaną w monitorowaniu ciąży i prognozowaniu terminu porodu jest ultrasonografia.

Propagacja fali ultradźwiękowej wiąże się jednak z depozycją w ośrodku energii, która doprowadza do lokalnego wzrostu temperatury o wartości zależnej od natężenia fali i czasu jej oddziaływania. Największe wartości natężenia (do  $800 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) występują przy badaniach typu cwD (*continuous wave Doppler*). Przy obrazowaniu echograficznym wartość natężenia rzadko przekracza  $100 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Czas badania wynosi kilkadziesiąt sekund. Aby wywołać wzrost temperatury powyżej  $42^\circ\text{C}$ , tj. hipertermię, jak wykazują próby stosowania ultradźwięków w terapii nowotworowej, konieczne jest zastosowanie natężeń fali ultradźwiękowej o wartościach znacznie większych niż na potrzeby diagnostyczne.

Kolejnym szkodliwym zjawiskiem jest tzw. kawitacja (powstawanie w cieczy pęcherzyków wypełnionych gazem przy spadku ciśnienia poniżej wartości progowej). Czynniki, które do tego prowadzą, są: wartość ujemnego ciśnienia wywołanego propagacją fali akustycznej i czas trwania impulsu ultradźwiękowego.

W 1976 roku Amerykański Instytut Ultradźwięków określił dopuszczalne dawki ultradźwięków stosowanych w medycynie. Zgodnie z nimi nie zauważono żadnych znamienych oddziaływań ultradźwięków *in vivo* na tkanki ssaków przy natężeniach fali poniżej  $0,1 \text{ W}/\text{cm}^2$  (bez ogniskowania) oraz  $1 \text{ W}/\text{cm}^2$  przy ogniskowaniu (wartość szczytowa w przestrzeni, uśredniona w czasie, oznaczona skrótem SPTA (*Space Peak Time Average*), mierzona w wodzie). Przy większych natężeniach nie stwierdzono zmian biologicznych, gdy iloczyn natężenia i czasu działania ultradźwięków był mniejszy niż  $50 \text{ Ws}/\text{cm}^2$ , przy czasie działania ultradźwięków w zakresie (1–500) s (bez ogniskowania) oraz krótszego niż 50 s dla wiązki zogniskowanej. W 1992 roku amerykańskie organizacje NEMA (*North American Manufactures Association*) i AIUM (*American Institute of Ultrasound in Medicine*) wyraziły zgodę na dobrowolną standaryzację ultradźwiękowego sprzętu diagnostycznego oraz umieszczanie odpowiedniej informacji na ekranie aparatu.

#### 4. PODSUMOWANIE

Nowoczesne ultrasonografy są złożonymi urządzeniami sterowanymi komputerowo. Ultrasonografia znajduje obecnie coraz szersze zastosowanie w inżynierii biomedycznej zarówno na potrzeby diagnostyki, jak i terapii. W artykule przedstawiono przykłady: diagnostycznego zastosowania obrazowania USG we współczesnym położnictwie oraz terapeutycznego zastosowania ultradźwiękowych fal uderzeniowych do kruszenia kamieni nerkowych. Postęp technologiczny umożliwia budowę wielofunkcyjnej aparatury o bardzo wysokiej rozdzielczości i specjalistycznym oprogramowaniu pozwalającym na 2-, 3- i nawet 4-wymiarowe obrazowanie. W pracy poruszono również kwestię bezpieczeństwa badań

ultradźwiękowych. Ultrasonografię uznaje się za skuteczną i bezpieczną technikę, ale ze względu na możliwość powstawania w organizmie człowieka efektów termicznych i kawitacyjnych konieczny jest dobór fali akustycznej o odpowiedniej częstotliwości i możliwie najmniejszej mocy.

### LITERATURA

- [1] Pawlicki G., *Podstawy inżynierii biomedycznej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997.
- [2] Polska Akademia Nauk, *Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna 2000, Tom 2, Biopomiary*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.
- [3] Polska Akademia Nauk, *Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna 2000, Tom 8, Obrazowanie biomedyczne*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2003.
- [4] Hryniewicz Z.A., Rokita E., *Metody diagnostyki medycznej i terapii*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000.
- [5] Tadeusiewicz R., Śmietański J., *Pozyskiwanie obrazów medycznych*, Wyd. Studenckiego Towarzystwa Naukowego, Kraków 2011.
- [6] <http://www.ginekolog.krakow.pl/usg.htm> Dostęp 01.2014 r.

### APPLICATION OF ULTRASOUNDS IN BIOMEDICAL ENGINEERING

This paper describes the selected problems concerned with the common use of ultrasounds in biomedical engineering. The modern USG units are the complex computer-controlled devices. In a lot of cases ultrasonography is only one method which may be safely used in medical imaging. Firstly, some selected applications of ultrasonography in obstetrics are presented. Different kinds of the acquired data presentation are described. Secondly, specific questions concerning disintegration of the kidney stones by the use of the ultrasonic shock waves are mentioned. Safe applying the ultrasounds has been also raised, focusing on the means of the protection from the harmful influence „noise” of ultrasounds and on the safety of ultrasonic investigations.