



Analiza czasowo-częstotliwościowa sygnału EKG

ANDRZEJ PIENIĘŻNY

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Radioelektroniki,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. Sygnały biomedyczne stanowią bardzo szczególną klasę sygnałów zarówno ze względu na ich strukturę, jak i szczególne podejście do ich analizy. Są one sygnałami niestacjonarnymi. Podstawowe metody analizy tego typu sygnałów obejmują analizę czasową i częstotliwościową, realizowane rozdzielnie. Rozdzielność analizy czasowej i częstotliwościowej sygnałów biomedycznych nie pozwala na pełną diagnozę z uwagi na zmienność ich struktury częstotliwościowej w czasie. Artykuł przedstawia pewne wyniki czasowo-częstotliwościowej analizy sygnału EKG.

Słowa kluczowe: analiza czasowo-częstotliwościowa, sygnał EKG, sygnały biomedyczne — analiza
Symbolne UKD: 616-073.7

Wprowadzenie

Sygnały biomedyczne mają różną naturę fizyczną. Najbardziej znanymi i szeroko stosowanymi w diagnostyce są sygnały elektryczne. Należą do nich między innymi: sygnał odwzorowujący pracę serca — elektrokardiogram, mózgu — elektroencefalogram, mięśni — elektromiogram), jelit — elektointestynogram. Organizmy żywe generują również inne ważne sygnały, do których należą na przykład sygnały magnetyczne — magnetokardiografia, mechaniczne — rejestracja ciśnienia krwi, ruchów oddechowych, skurczów mięśnia macicy, akustyczne — fonokardiografia, chemiczne — zmiany stężenia poziomu hormonów we krwi, temperaturowe [1, 3, 8-11]. Analiza sygnałów nieelektrycznych wymaga dodatkowego etapu przetwarzania wstępnego sygnału za pomocą specjalnie dobranych przetworników dokonujących konwersji sygnału nieelektrycznego na elektryczny. Dla przykładu, dla sygnałów temperaturowych można uzyskać ich odpowiedniki elektryczne, stosując termopary, termistory, oporowe detektory temperatury. Konwersję sygnałów akustycznych

uzyskujemy przez zastosowanie mikrofonów o odpowiednich charakterystykach itp. Samo przekształcenie sygnału nieelektrycznego na jego odpowiednik elektryczny nie jest ostateczne, ten ostatni może wymagać jeszcze przetwarzania wstępnego, takiego jak linearyzacja, wzmacnienie, filtrowanie. Współczesne przetwarzanie sygnałów biomedycznych bazuje na dwóch zasadniczych rozwiązaniach: zainstalowanym w aparaturze diagnostyczno-terapeutycznej, procesorze sygnałowym przetwarzającym zarejestrowane sygnały ściśle zgodnie z niemodyfikowanym przez użytkownika programem oraz sprzężonym z aparaturą medyczną komputerze, umożliwiającym swobodną zmianę algorytmu przetwarzania sygnału. Analiza literaturowa problemu wskazuje, że sygnały biomedyczne stanowią szczególną klasę sygnałów ze względu na ich strukturę oraz na szczególne podejście do ich analizy. Są to głównie sygnały niestacjonarne. Do podstawowych metod analizy tego typu sygnałów należy zaliczyć analizę czasową i częstotliwościową, realizowane rozdzielnie. Czasowo-częstotliwościowa rozdzielność analizy sygnałów biomedycznych nie pozwala w pewnych sytuacjach na pełną diagnozę z uwagi na zmienność ich struktury częstotliwościowej w czasie. Charakterystyki wybranych sygnałów biomedycznych przedstawiono w tabeli 1. Artykuł omawia czasowo-częstotliwościową analizę zespołu QRS.

TABELA 1

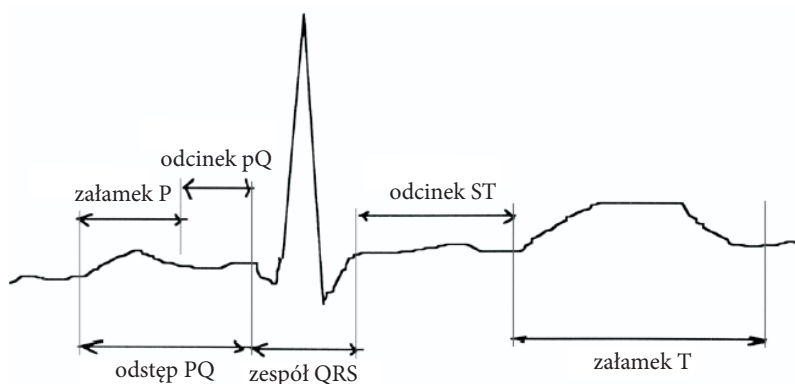
Charakterystyki wybranych sygnałów medycznych

Nazwa sygnału	Zakres częstotliwości	Amplituda sygnału
Elektrokardiograficzny	0-500 Hz	0-10 μ V (płód) 0-5 mV (dorosły)
Elektroencefalograficzny	0-100 Hz	0-100 μ V
Elektromiograficzny	10-200 Hz	Silnie zależny od aktywności mięśniowej i miejsca zamocowania elektrody
Częstość uderzeń serca	25-210 uderzeń/minutę	-
Częstość oddechowa	10-40 oddechów/minutę	-
Ciśnienie krwi	0-200 Hz	30-300 mm Hg (tętnicze) 0-15 mm Hg (żylny)

Elektrokardiogram

Elektrokardiogram (EKG) jest testem używanym do oceny stanu serca — systemu przewodzenia, mięśnia sercowego i pośrednio do oceny serca w funkcji pompy. EKG to graficzne przedstawienie elektrycznej aktywności (napięcia) mięśnia sercowego, a urządzenie do jego wykonywania jest nazywane elektrokardiografem.

Serie falistych linii to zapis elektrokardiograficzny wykonany elektrokardiografem, który czyta uderzenia serca i drukuje je na specjalnym papierze czułym na nacisk. Zapisy te są narzędziem w rękach lekarza, pozwalającym na diagnozę nieprawidłowości działania serca. Serce bije, ponieważ fala elektrycznej energii porusza się przez tkanki serca, począwszy od przedsionka, poruszając się w dół do komór. Ta fala elektryczna powoduje, że mięśnie serca kurczą się i krew wydostaje się pod ciśnieniem z serca. W sercu znajduje się węzeł przedsionkowo-zatokowy, który wysyła krótkie impulsy energii elektrycznej rozprzestrzeniające się po systemie przewodzenia serca. Mały okrągły załamek „P” powstaje w przedsionku, podczas gdy duży kolec „R” powstaje w komorach. Załamek „P” tworzy się w wyniku depolaryzacji i następujących po niej skurczach przedsionka. Załamek „R” (nazywany zespołem QRS) jest depolaryzacją komór. Załamek „T” to repolaryzacja komór, po której mięsień sercowy jest przygotowany na następny impuls z węzła przedsionkowo-zatokowego. Nieregularności w kształcie zespołów P-QRS-T wskazują na nieprawidłowości w mięśniu sercowym.

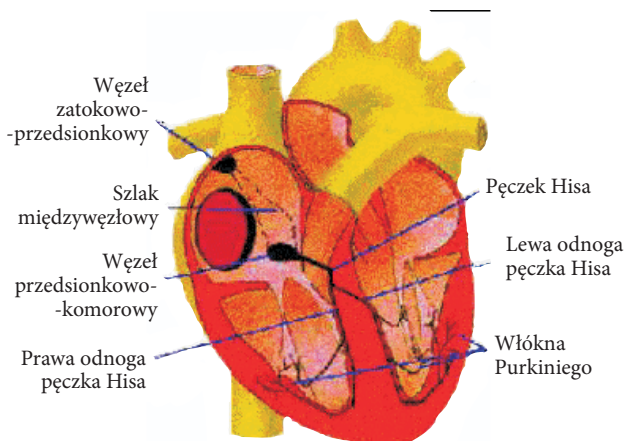


Rys. 1. Podstawowy przebieg EKG w dziedzinie czasu

Procesy elektryczne mięśni serca a przebieg EKG

Pobudzane elektrycznie włókna mięśnia serca powodują powstanie zmiennego w czasie pola elektrycznego. Kolejność ich pobudzania i ilość czynnych elektrycznie włókien w danej chwili powoduje kształtowanie potencjału i kierunku pola elektrycznego. Powstanie załameków elektrokardiogramu należy analizować w zestawieniu z anatomicznymi strukturami, które są aktywne w okresie zapisu. Wyróżniane są dwa rodzaje włókien pobudzanych elektrycznie: włókna kurczliwe oraz włókna przewodzące. Pierwszy rodzaj tworzy się w grubych warstwach mięśni przedsionków, przegród i komór. Włókna przewodzące układają się w pasma lub grupują w postaci węzłów, tworząc układ przewodzący serca. Do układu przewo-

dzącego należy węzeł zatokowy (Keith-Flacka), węzeł przedsionkowo-komorowy A-V (Tawary), wspólny pęczek Hisa, lewa i prawa odnoga pęczka Hisa oraz włókna Purkiniego (rys. 2).

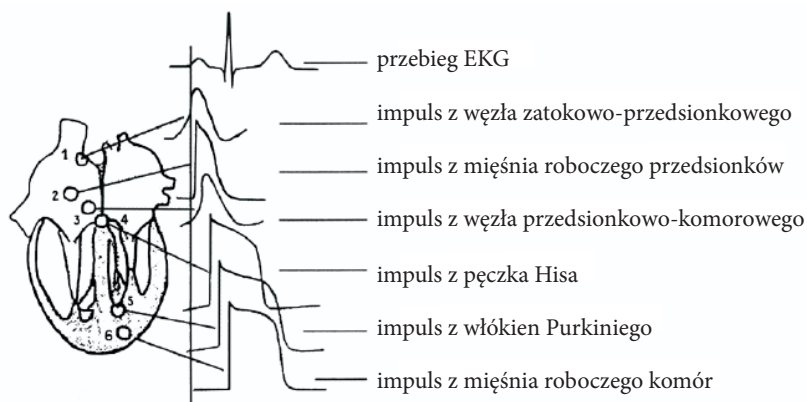


Rys. 2. Podstawowe elementy układu przewodzącego serca

We włóknach górnej części węzła zatokowego kształtowane są pobudzenia. Węzeł zatokowy ma najwyższą częstotliwość wyzwalania pobudzeń; jest to rytm prowadzący. Ośrodki leżące niżej, takie jak węzeł przedsionkowo-komorowy i pęczek Hisa, cechuje wolniejszy rytm. W wyniku tego, w przypadkach fizjologicznie prawidłowych, te włókna mięśniowe ulegają szybszemu pobudzeniu z węzła zatokowego, zanim zdążą rozładować pobudzenie poprzednie. Z węzła zatokowego pobudzenie przemieszcza się do mięśnia prawego przedsionka, a następnie przez jego przednią ścianę ku lewemu przedsionkowi. Zatem pierwszą pobudzaną częścią serca jest prawy przedsionek. Na końcowy czas pobudzenia prawego przedsionka nakłada się już rozpoczęty proces aktywacji lewego przedsionka. W pobudzaniu przedsionków wyróżniamy dwa okresy depolaryzacji prawego i lewego przedsionka. Efektem tego procesu jest załamek „P” obserwowany na EKG. Po depolaryzacji przedsionków krzywa EKG przebiega poziomo, tworząc płaski odcinek P-Q. Fala pobudzająca przemieszcza się w dół, obejmując węzeł przedsionkowo-komorowy, pęczek Hisa oraz układ włókien Purkiniego. Pobudzenie węzła A-V występuje ze znacznym opóźnieniem około jednej dziesiątej części sekundy po załamku „P”. Właściwość opóźnienia fali pobudzenia na drodze do komór jest ważnym mechanizmem ochronnym. Broni on komory przed nadmierną częstotliwością ich pobudzania od strony przedsionków.

Po powstaniu załamka Q fala pobudzenia elektrycznego przemieszcza się w warstwie lewej i prawej komory, przez całą grubość mięśnia komór od strony jamy serca ku powierzchni zewnętrznej. Fala pobudzenia wygasa szybciej w pra-

wej komorze z powodu krótkiej drogi przez jej cienki mięsień. Fala pobudzenia przepływająca przez znacznie grubszą masę mięśniową lewej komory wzbudza znacznie silniejszy, bo około dziesięciokrotnie większy potencjał. Przebieg wypadkowy tego etapu jest uwarunkowany komorą lewą i jest on widoczny jako wysoki załamek „R”. Odcinek S-T, który występuje po zespole RS, odpowiada okresowi powolnej repolaryzacji mięśnia komór. Cały sygnał EKG będący sumą wszystkich potencjałów wygenerowanych w cyklu pracy serca przedstawiono na rysunku 3. Wykrywanie późnych potencjałów komorowych ze względu na to, iż prowadzą one do częstoskurczu komorowego, a w konsekwencji do poważniejszych powikłań kardiologicznych, jest istotnym składnikiem diagnostyki serca.



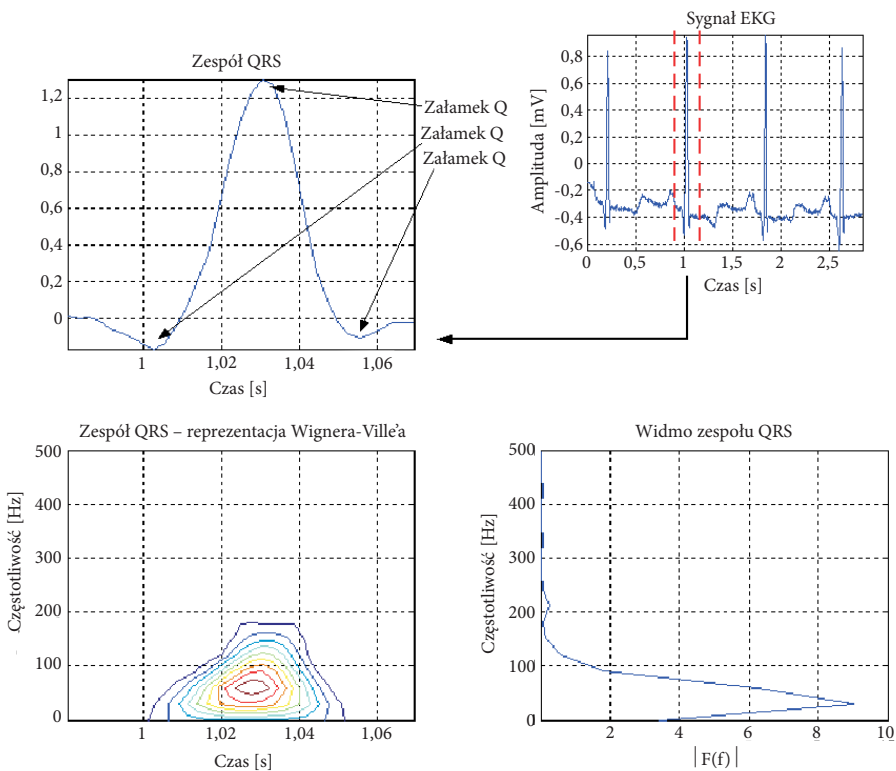
Rys. 3. Sygnał EKG będący sumą wszystkich potencjałów wygenerowanych w cyklu pracy serca

Przetwarzanie wybranych sygnałów EKG

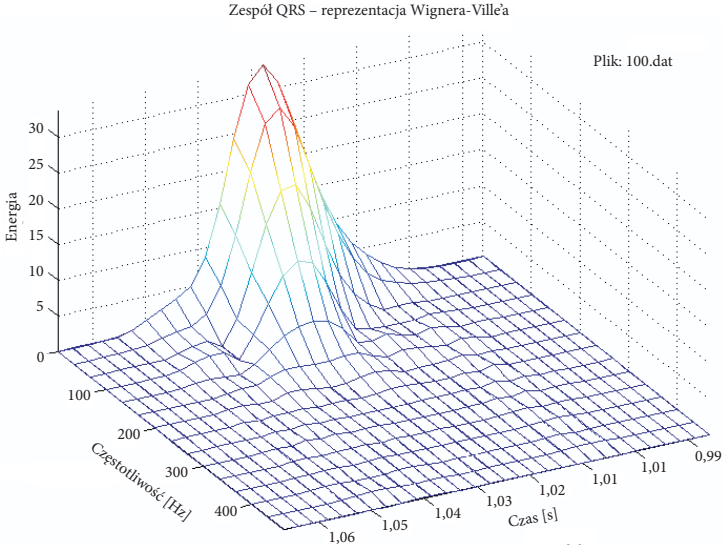
Analiza czasowa jest powszechnie stosowaną metodą w diagnostyce i profilaktyce kardiologicznej. Polega ona na analizie porównawczej przebiegów generowanych przez elektrokardiograf. Badaniu podlegają amplitudy poszczególnych załameków, ich rozmieszczenie w czasie oraz częstość występowania. Jak wykazują badania, utrwalony częstoskurcz komorowy charakteryzuje się częstością pobudzenia komór 150-250 uderzeń/min i jest trudny do wykrycia. Może być również względnie dobrze tolerowany i nie dawać zaburzeń hemodynamicznych.

Metody czasowo-częstotliwościowe umożliwiają opracowanie metod wykrywania późnych potencjałów komorowych w oparciu o analizę zespołów QRS w dziedzinie czasu i częstotliwości. Jednoczesna „obserwacja” danych, w analizowanym przypadku zespołu QRS, w dziedzinie czasu i częstotliwości umożliwia wykrycie cech zjawiska, których istnienie przy „obserwacjach” rozdzielnych jest trudne do stwierdzenia. Idea analizy czasowo-częstotliwościowej przyjęta w niniejszej pracy

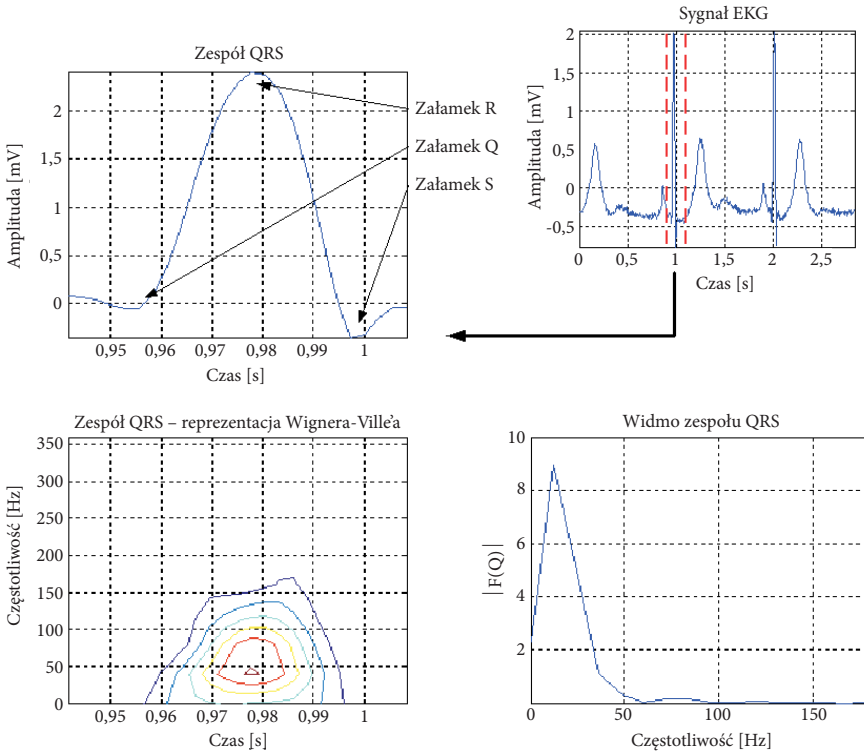
opiera się na rozkładzie Wignera. Rozkład ten, stosowany w mechanice kwantowej, został przez Ville'a zastosowany w teorii sygnałów. Stąd też w teorii sygnałów rozkład ten jest nazywany rozkładem Wignera-Ville'a (WV) [2, 4-7]. Podstawową cechą przekształcenia Wignera-Ville'a jest to, iż jest ono nieliniowe i w związku z tym należy się spodziewać, że dla przypadku jednoczesnej analizy wielu sygnałów będą występować efekty niepożądanych oddziaływań pomiędzy sygnałami. Natomiast istotne jest również to, że przekształcenie WV opisuje energetyczny rozkład sygnału w dziedzinie czasu i częstotliwości. Stąd też można go stosować w obserwacjach zjawisk o niestacjonarnym charakterze, jak np. zespół QRS. Badania zespołu QRS przeprowadzono w oparciu o internetową bazę danych sygnałów biomedycznych <http://physionet.incor.usp.br> MIT-BIH Arrhythmia Database w Bostonie. Sygnały EKG, które poddano przetwarzaniu dotyczyły osób cierpiących na częstoskurcz komorowy. Wybrane wyniki przedstawiono na rysunku 4.



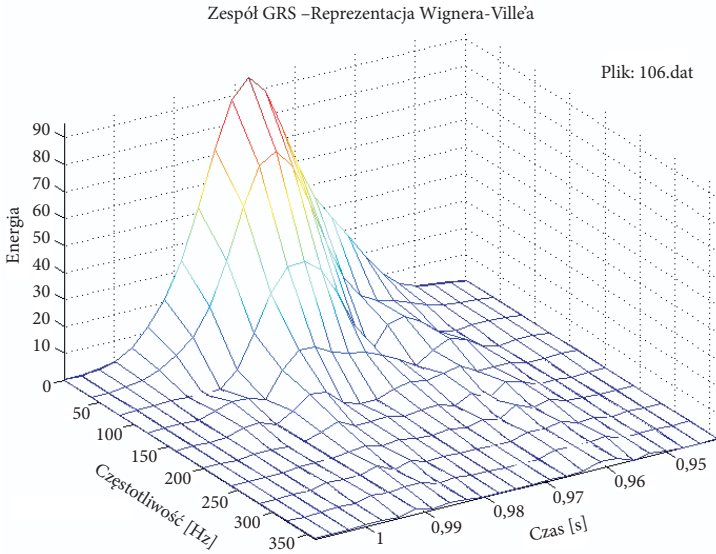
Rys. 4. Zespół QRS osoby zdrowej



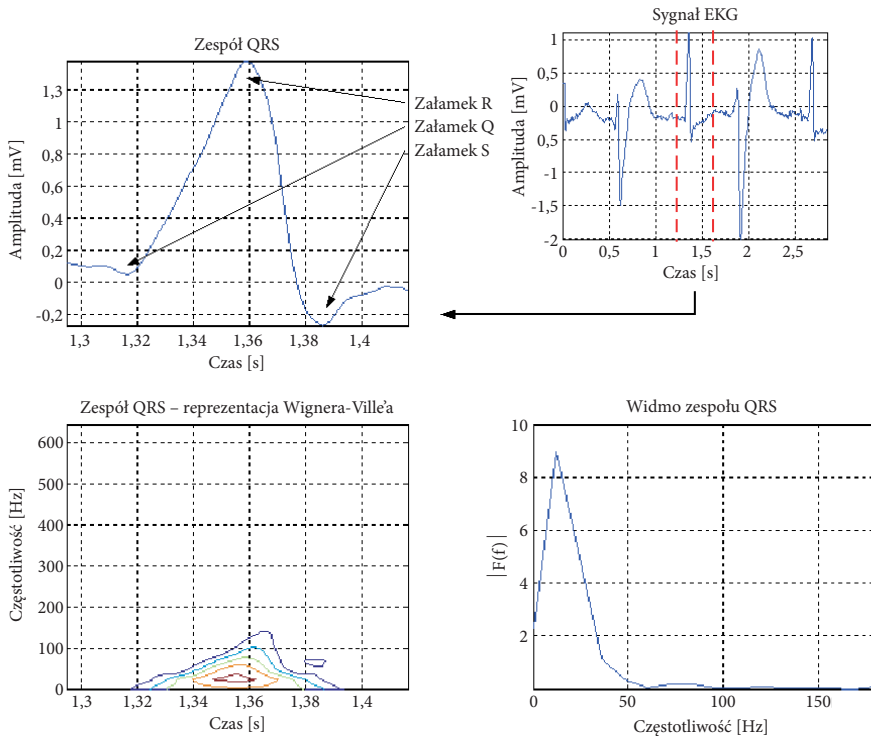
Rys. 5. Zespół QRS osoby zdrowej — rozkład częstotliwościowo-czasowy



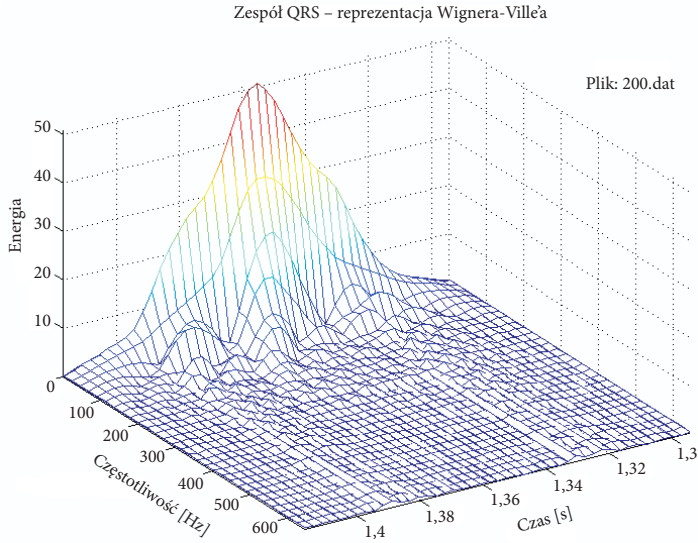
Rys. 6. Zespół QRS kobiety lat 24, stwierdzony częstoskurcz komorowy



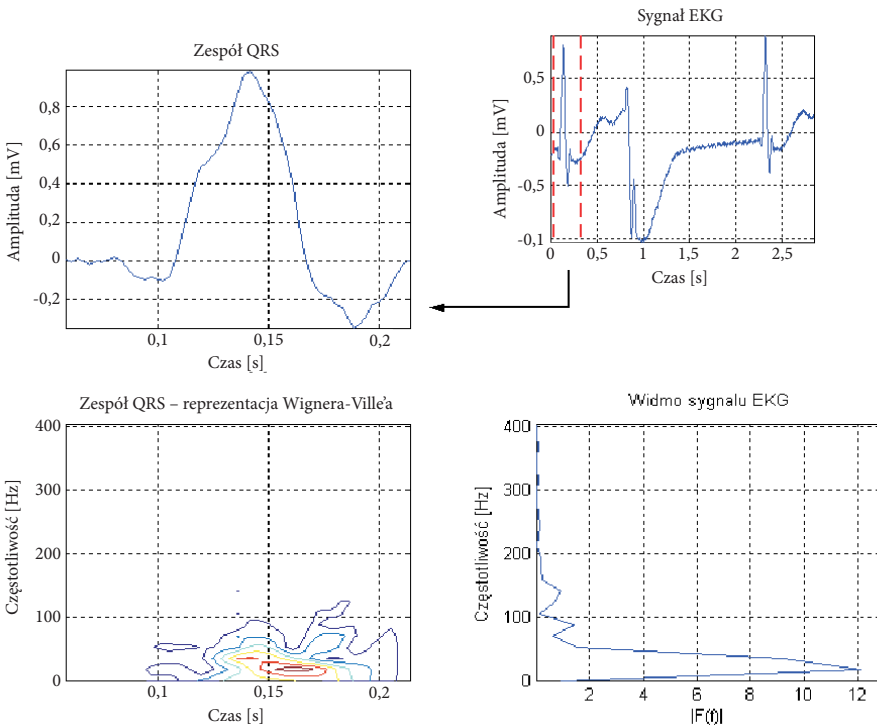
Rys. 7. Reprezentacja czasowo-częstotliwościowa zespołu QRS kobiety lat 24, stwierdzony często-skurcz komorowy



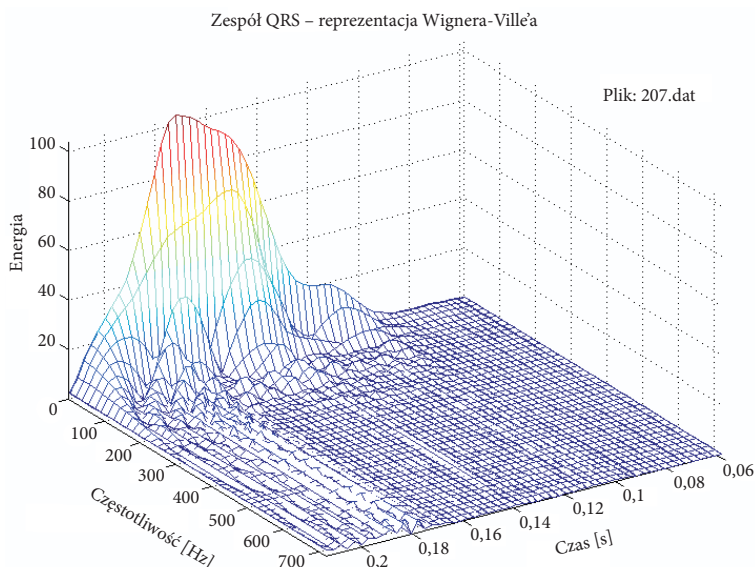
Rys. 8. Zespół QRS mężczyzny lat 64, stwierdzony często-skurcz komorowy oraz bradykardia



Rys. 9. Reprezentacja czasowo-częstotliwościowa zespołu QRS mężczyzny lat 64, stwierdzony częstoskurcz komorowy oraz bradykardia



Rys. 10. Zespół QRS mężczyzny lat 69, stwierdzony częstoskurcz komorowy, bradykardia oraz migotanie przedsionków



Rys. 11. Reprezentacja czasowo-częstotliwościowa zespołu QRS mężczyzny lat 69, stwierdzony częstoskurcz komorowy, bradykardia oraz migotanie przedsionków

Wnioski

Artykuł podejmuje kwestię czasowo-częstotliwościowej analizy zespołu QRS. Podsumowując, można stwierdzić, że przekształcenia czasowo-częstotliwościowe reprezentowane w pracy przekształceniem WV można stosować do analizy sygnałów EKG. Z analizowanego sygnału można ocenić zespoły późnych potencjałów komorowych, aczkolwiek wiarygodne stosowanie prezentowanego podejścia wymaga żmudnych badań. Analizy czasowe i częstotliwościowe stosowane rozdzielnie nie dają jednoznacznych rezultatów i nie pokazują rozkładu energii sygnału. Natomiast na reprezentacjach czasowo-częstotliwościowych jest uwidocznione nałożenie się energii późnych potencjałów na falę pobudzenia mięśni komór w trakcie trwania zespołu. Wykresy konturowe pokazują wyraźne przemieszczenie energii w kierunku końca trwania zespołu QRS z widocznym występowaniem PPK w zakresie częstotliwości od 100-300 Hz oraz występowaniem pobudzeń w początkowej fazie trwania zespołu, na częstotliwościach od 40-100 Hz. Występowanie tych pobudzeń daje informację o możliwości wystąpienia w przyszłości zaburzeń w komórkach przewodzących mięśni komór, co prowadzi do częstoskurczu komorowego. Można stwierdzić, że analiza późnych potencjałów EKG z zastosowaniem reprezentacji czasowo-częstotliwościowej daje zachęcające wyniki jako narzędzie do identyfikacji pacjentów zagrożonych chorobami wieńcowymi. Metoda ta może być brana pod uwagę jako uzupełnienie istniejących metod diagnostyki serca.

Artykuł wpłynął do redakcji 23.04.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w maju 2008 r.

LITERATURA

- [1] M. AKAY, (ed.) *Time-Frequency and Wavelets in Biomedical Signal Processing*, IEEE Press, 1998.
- [2] J. JAKUBOWSKI, *Wykorzystanie reprezentacji czasowo-częstotliwościowych w analizie sygnałów niestacjonarnych*, Biul. WAT, 2, 1999.
- [3] A. J. MROCZKO, L. KRAMER, *Cyfrowe metody przetwarzanie sygnałów biomedycznych*, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań, 2001.
- [4] L. COHEN, *Time-Frequency Distribution — A Review*, Proceedings of the IEEE, vol. 77, no. 7, July 1989.
- [5] B. BOASHASH, *Time-Frequency Analysis and the Wigner-Ville Distribution*, *Advanced Algorithms and Architectures for Signal Processing III*, SPIE, vol. 975, 1988.
- [6] T. A. C. M. CLAASEN, W. F. G. MECKLENBRAUKER, *The Wigner Distribution — A Tool for Time-Frequency Signal Analysis*, Part I: *Continuous Time Signals*, Philips Journal of Research, vol. 35, no. 3, 1980.
- [7] T. A. C. M. CLAASEN, W. F. G. MECKLENBRAUKER, *The Wigner Distribution — A Tool for Time-Frequency Signal Analysis*, Part II: *Relations with other Time Frequency Signal Transformations*, Philips Journal of Research, vol. 35, no. 46, 1980.
- [8] S. QIAN, D. CHEN, *Joint Time-Frequency Analysis. Methods and Applications*, Prentice Hall, 1996.
- [9] S. HATZOPOULOS, J. CHENG, A. GRZANKA, A. MARTINI, *Time-Frequency Analysis of TEOAE Recordings from Normals and SNHL Patients*, *Audiology*, Jan.-Feb. 2000.
- [10] M. STĘPCZAK, *Elektrodiagnostyka medyczna*, PZWL, Warszawa, 1984.
- [11] W. Z. TRACZYK, A. TRZEBISK, *Fizjologia człowieka z elementami fizjologii klinicznej*, PZWL, Warszawa, 1980.

A. PIENIĘŻNY

Time-frequency analysis of ECG signal

Abstract. Biomedical signals are specific type of signals due to their structure and specific approach to their analysis. They are usually non-stationary signals. Basic methods of analysis include time and frequency analyses performed separately. Frequency structure of biomedical signals varies in time so, patient diagnose could be better when time-frequency analysis concept will be applied. The paper presents some results of time-frequency analysis of ECG signal.

Keywords: time-frequency analysis, ECG signal, biomedical signals — analysis

Universal Decimal Classification: 616-073.7

