

Nazwisko.....

Data

Kierunek

Imię.....

Dzień tyg.

Godzina

Ćwiczenie B14

Analiza biofizycznych właściwości sygnału w EKG

Tabela I: Pomiar parametrów załamków oraz zespołu w elektrokardiogramie

Załamek /Zespół	Początek	Koniec	Czas trwania
	t_p , [s]	t_k , [s]	Δt , [ms]
P			
QRS			
T			

Tabela II: Pomiar parametrów odcinków w elektrokardiogramie

Odcinek	Początek	Koniec	Czas trwania
	t_p , [s]	t_k , [s]	Δt , [ms]
PQ			
ST			
TP			

Tabela III: Pomiar odstępów (interwałów) w elektrokardiogramie

Odstęp	Początek	Koniec	Czas trwania
	t_p , [s]	t_k , [s]	Δt , [ms]
PQ			
QT			
ST			
RR			

Tętno	T_{sr}	T_{RR}	δ
	[1/min]	[1/min]	%

Tabela 1. Przykładowe prawidłowe wartości czasu trwania załamków i zespołów, odcinków oraz odstępów odczytanych z zapisu elektrokardiograficznego (EKG), dla pomiaru w spoczynku.

	Przykładowy prawidłowy czas [ms]	Limit normalny czasu [ms]
	Załamek/Zespół	
P	110	± 20
QRS	90	± 40
T	210	± 50
	Odcinek	
PQ	85	± 35
ST	100-150	± 20
TP	norma zmienna w zależności od częstości pracy serca	
	Odstęp	
PQ	160	± 40
QT	400	± 100
ST	100	± 20
RR	600-1200	± 100

Ćwiczenie B14: Analiza biofizycznych właściwości sygnału w EKG

CEL

Ćwiczenie ma na celu przybliżenie metody elektrokardiograficznego pomiaru pracy serca – jednego z najbardziej podstawowych badań wykorzystywanych w medycynie do analizy pracy mięśnia sercowego oraz patologii w przebiegu różnego rodzaju zaburzeń fizjologicznych i chorób. Ćwiczenie umożliwia zapoznanie się z podstawami fizycznymi badania, działaniem aparatury rejestrującej, analizą i interpretacją zarejestrowanych danych, jak również sprawdzeniem w jaki sposób parametry bioelektryczne oraz odpowiednie rozmieszczenie elektrod wpływa na jakość otrzymanego sygnału.

Ważne: ćwiczenie ma charakter edukacyjny, niemiarodajny i niemedyczny. Jego zadaniem jest zrozumienie podstaw działania elektrokardiografu, wykorzystanie parametrów otrzymanych w praktyce oraz ćwiczenie umiejętności rachunkowych, natomiast nie analizę otrzymanych wyników pod kątem medycznym.

Otrzymane w badaniu dane nie są danymi medycznymi, nie mogą być także za takie uznawane, ponieważ urządzenie pomiarowe nie jest atestowanym elektrokardiografem, a prostym narzędziem edukacyjnym, a osoby wykonujące je nie posiadają uprawnień do analizy zdrowotnej otrzymanych wyników. Dodatkowo dane nie są zapisywane na komputerze i służą wyłącznie do zrozumienia zjawisk biofizycznych.

TEORIA

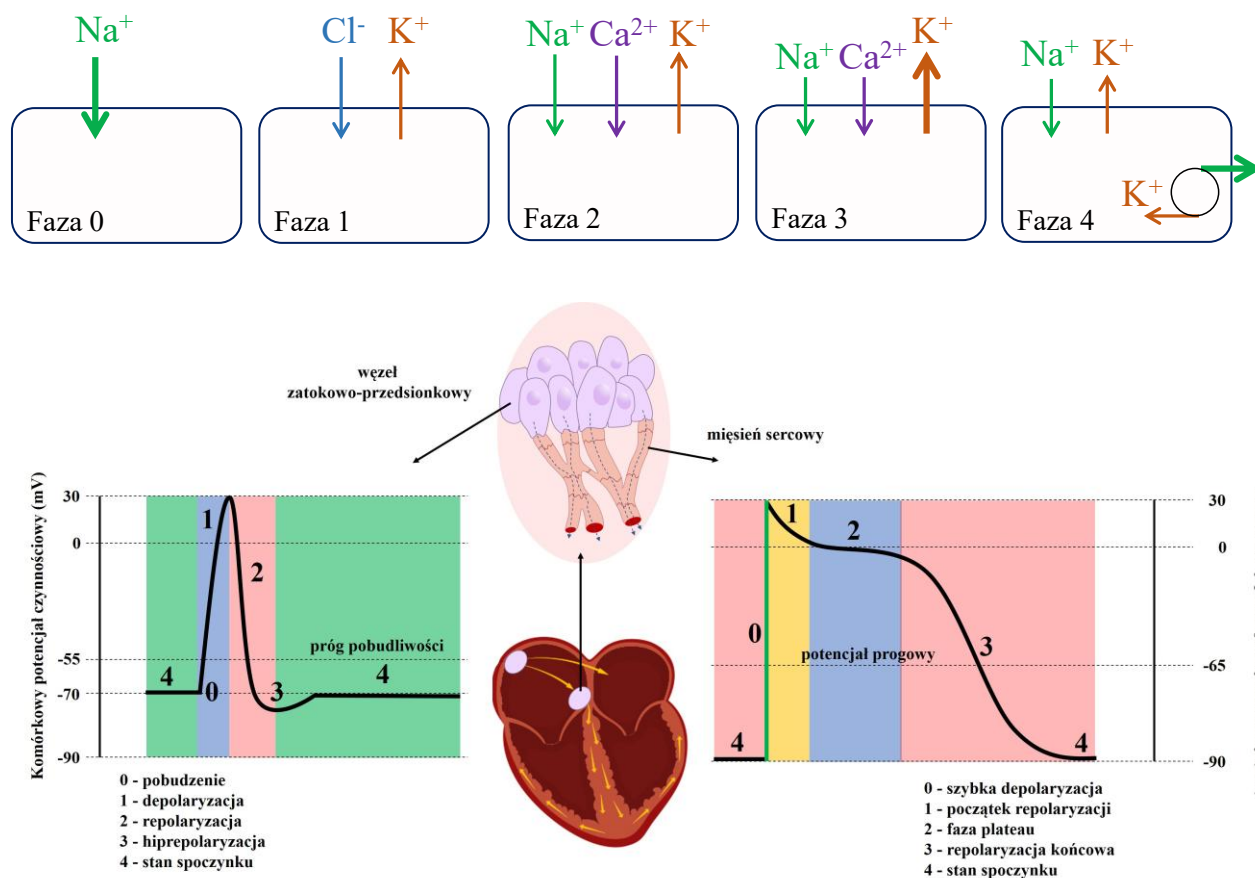
Motoryka mięśnia sercowego opiera się na przewodzeniu impulsów elektrycznych, które mają bezpośredni wpływ na jego skurcz i rozkurcz. Centralnym elementem inicjującym pracę serca jest **węzeł zatokowo-przedsionkowy**, z którego sygnał rozprawdany jest przez układ bodźcotwórczo-przewodzący – inicjując **rytm zatokowy**. Sygnały elektryczne przekazywane przez powyższy układ powodują występowanie zjawisk depolaryzacji i polaryzacji komórek mięśnia sercowego – kardiomiocytów. Lokalne zmiany potencjału elektrycznego wywołane zachodzeniem depolaryzacji i polaryzacji, umożliwiają analizę pracy serca przy użyciu **elektrod** umieszczanych na powierzchni ciała oraz zbierającego sygnały - **aparatu EKG**. Aby zrozumieć zasady działania mięśnia sercowego warto przypomnieć sobie podstawowe fakty o polaryzacji błon komórkowych komórek pobudliwych.

Komórki mięśnia sercowego, podobnie jak inne komórki zdolne są do pobudzenia. W stanie spoczynku wewnętrzny potencjał błonowy jest ujemny, zewnętrzny zaś dodatni. Ma to ogromne znaczenie, przede wszystkim ze względu na fakt istnienia połączeń międzykomórkowych istniejących między kolejnymi komórkami włókien. Zjawisko to wykorzystywane jest w trakcie depolaryzacji pierwszej komórki, która przez pojawienie się wewnętrznego dodatniego potencjału, rozprawdza ten sygnał do kolejnych komórek powodując ich „lawinową” depolaryzację.

Depolaryzacja jest procesem niezbędnym do pojawienia się potencjału czynnościowego i skurczu mięśnia - w tym przypadku mięśnia serca. Cała aktywność elektryczna serca inicjująca skurcz, jest wynikiem przepływu jonów przez błony kardiomiocytów. Można wyróżnić następujące fazy powstawania potencjału czynnościowego komórek mięśniowych serca (Rys. 1):

- Faza 0 – zależna od prądu sodowego (jony Na^+), której efektem jest gwałtowny wzrost potencjału czynnościowego związany z napływem jonów dodatnich do wnętrza kardiomiocytów, powodując depolaryzację błon.
- Faza 1 – związana z dośrodkowym prądem chlorkowym (Cl^-) i odśrodkowym prądem potasowym (K^+), powodująca wstępną szybką repolaryzację.
- Faza 2 – powolna repolaryzacja, związana ze stabilizacją potencjału przez dośrodkowy prąd wapniowo-sodowy ($\text{Ca}^{2+} / \text{Na}^+$) i odśrodkowy prąd potasowy (K^+), nazywana fazą plateau.

- Faza 3 – faza szybkiej, końcowej repolaryzacji, wywołana przez zwiększenie odśrodkowego prądu potasowego (K^+) i przeważenie nad wygasającym dośrodkowym prądem wapniowo-sodowym (Ca^{2+}/Na^+).
- Faza 4 – powrót do potencjału spoczynkowego – polaryzacja.

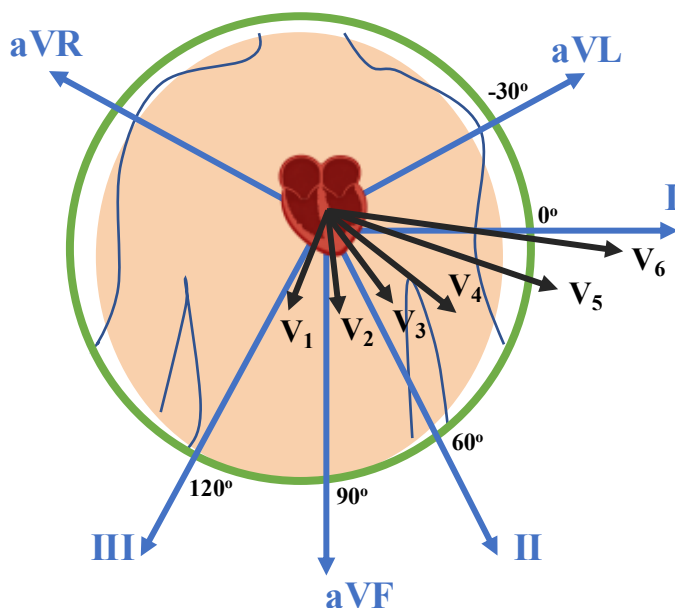


Rysunek 1 Graficzne przedstawienie zmian jonowych zachodzących w poszczególnych fazach potencjału czynnościowego komórek mięśniowych serca

Potencjały czynnościowe kardiomiocytów mogą się sumować, czego konsekwencją jest tworzenie się **zmiennego pola elektrycznego** w okolicach mięśnia sercowego (model **dipola elektrycznego**). Aparatura EKG rejestruje dynamiczne zmiany wektora orientacji i wartości tego pola w przestrzeni trójwymiarowej, następujące wraz z kolejnymi etapami cyklu sercowego. Do rejestracji powyższych zmian wykorzystuje się elektrody rozmieszczane na powierzchni ciała – w różnych lokalizacjach, tworząc **odprowadzenia EKG** – których przykładami mogą być np. standardowe odprowadzenia kończynowe i przedsercowe.

Czym są jednak odprowadzenia EKG? Tak jak inne obiekty trójwymiarowe, serce może być poddane badaniu z różnych kierunków. Sygnały otrzymywane w EKG są z tym ściśle związane. W klasycznym elektrokardiografie sygnał rejestrowany jest przy użyciu elektrod rozmieszczonych na powierzchni ciała, których zadaniem jest detekcja różnic potencjałów elektrycznych. W EKG stosuje się więc odprowadzenia kończynowe (np. I, II, III, aVR, aVL, aVF), których zadaniem jest pomiar sygnału w płaszczyźnie czołowej, a także odprowadzenia przedsercowe (V1-V6), które zbierają sygnały z płaszczyzny poprzecznej (Rys. 2).

Mnogość odprowadzeń EKG umożliwia rejestrację sygnału jako **sumy składowych wektora elektrycznego**. Analiza tych sygnałów z różnych odprowadzeń pozwala na **wykreślenie zależności napięcia od czasu** w postaci wykresów, znanych z wyników EKG.



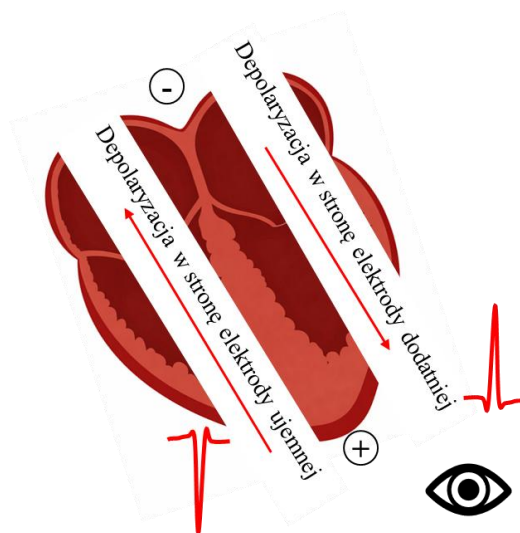
Rysunek 2 Najczęstsze stosowane odprowadzenia kończynowe w EKG

Jednym z najważniejszych jest **klasyczne kończynowe odprowadzenie typu II**, w którym rejestrowana jest różnica potencjałów elektrycznych między **prawym przedramieniem**, gdzie umieszczana jest **elektroda ujemna**, a **lewym podudziem** – gdzie znajduje się **elektroda dodatnia**. Warto wspomnieć, że odprowadzenie typu II można powiązać z **punktem widzenia obserwatora-badacza**. Badacz obserwuje serce od lewego podudzia w stronę prawego przedramienia. Z punktu widzenia elektrokardiografu, analizującego taki sygnał – każdy moment **depolaryzacji** biegnący w **stronę elektrody dodatniej** (czyli fala ładunków dodatnich wewnątrz komórek mięśnia sercowego przemieszczająca się **w kierunku obserwatora**) będzie oznaczać na wykresie pojawienie się **piku dodatniego**. Dlatego też, podczas depolaryzacji przedsionków (załamek P) oraz komór (zespół QRS) możemy zauważyć ogromny skok potencjału na wykresie. Pod koniec skurczu komór (załamek S) można zauważyć obniżenie potencjału. Ten chwilowy spadek również pochodzi od depolaryzacji komórek, ale dotyczy tych znajdujących się bliżej podstawy serca (zgodnie z przebiegiem włókien Purkiniego). **Depolaryzacja w kierunku przeciwnym do obserwatora (czyli w stronę elektrody ujemnej)** oznacza więc **pik ujemny** (Rys. 3).

Później jednak dochodzi do **repolaryzacji komórek** (czyli pojawiania się ładunków ujemnych wewnątrz komórek mięśnia serca). Stąd naturalny wydawałby się fakt obecności piku ujemnego związanego z tym faktem. Jednak wciąż jedyne co można zaobserwować na wykresie to kolejny dodatni załamek T. Dlaczego tak się dzieje?

Sygnał repolaryzacji rozchodzi się w komórkach mięśniowych wstecz, **od mięśnia komór, aż do węzła przedsionkowo-komorowego**. Jeżeli akumulacja ładunków dodatnich związana z **depolaryzacją**, przebiegająca **w kierunku obserwatora (elektrody dodatniej)**, pozwala na zaobserwowanie piku dodatniego, a **depolaryzacja** biegnąca od komór do węzła przedsionkowo-komorowego serca (czyli wstecz) piku ujemnego, to sygnał repolaryzacji biegnący również w kierunku **elektrody ujemnej** mięśnia będzie dodatni. Stąd na wykresie EKG zamiast ujemnego załamka, widzimy kolejny, dodatni załamek T.

Gdzie przebiega repolaryzacja przedsionków? Ukryta jest również jako pik dodatni w tle olbrzymiego sygnału zespołu QRS.



Rysunek 3 Otrzymywany sygnał w zależności od punktu widzenia obserwatora-badacza

Warto zauważyć, że dla biofizyka istotna może się wydawać nie tylko aktywność elektryczna serca, ale przede wszystkim równie istotne właściwości elektryczne tkanek – takie jak przewodnictwo, zjawiska pojemnościowe i impedancja. Zarówno mięsień sercowy, jak i otaczające go tkanki, a także płynąca krew i pokrywająca ciało skóra, stanowią fizyczne oporniki o różnych wartościach oporu elektrycznego. Wpływają one na sygnał EKG, zmieniając jego kształt, amplitudę ingerując w dokładność pomiaru. Sygnał dobrze przewodzony jest przez tkanki zawierające dużo wody – mięśnie, krew – ponieważ ich rezystancja jest niska. Inaczej jest w przypadku tkanki tłuszczowej oraz skóry, wykazującej znacznie większy opór elektryczny, mogą powodować zaburzenia rejestracji sygnału. Z fizycznego punktu widzenia, sygnały analizowane przez elektrokardiograf muszą zostać przeprowadzone przez system układów wzmacniających oraz filtrujących, których zadaniem jest wykreślenie linii pracy serca pozbawionej szumów pochodzących od innych mięśni, występujących innych pól elektrycznych oraz nieznaczających artefaktów i zakłóceń działania aparatury – pochodzących np. z sieci. Na pracę elektrokardiografu wpływ może mieć, także nieprawidłowe rozmieszczenie elektrod – lokalizacja/wysokość (np. ramię zamiast przedramienia), zamiana elektrod (ręce – nogi), które mogą prowadzić do nieprawidłowej interpretacji osi elektrycznej serca i następujących zmian dipola. Skutkiem tego mogą być zniekształcenia sygnału. W celu redukcji szumów pochodzących z pracy innych mięśni, zaleca się ograniczenie ruchów i przyjęcie pozycji spoczynkowej. Niektóre rodzaje ruchów, tj. samoistne drżenia mięśniowe, mimowolne tiki, mogą również wpływać na jakość rejestrowanego sygnału. Niekorzystne, są także skrajne warunki temperaturowe. Zbyt niska temperatura ciała może prowadzić do drżenia mięśniowego, zbyt wysoka zaś do nadmiernej potliwości – równie niepożądaną, z powodu zmian w przewodnictwie skóry. Wiedza dotycząca powyższych zmiennych wykorzystywana jest w codziennej praktyce medycznej i pozwala na prawidłową interpretację zapisu EKG, a także minimalizację czynników niesprzyjających.

Zapis w elektrokardiografii klasy medycznej prowadzony jest na papierze milimetrowym, którego jedna kratka na szerokość odpowiada 0,04 sekundy, natomiast na wysokość oznacza zmianę napięcia o 0,1 mV.

Elektrokardiograf wykorzystywany podczas ćwiczeń w Pracowni Biofizycznej przesyła sygnał do komputera wykreślającego wykres zależności napięcia od czasu i analizowany przy użyciu funkcji odczytu współrzędnych. Parametry sygnału odczytywane w tym ćwiczeniu można podzielić na 3 kategorie – *parametry załamków*, *parametry odcinków* oraz *parametry odstępów (interwałów)*. W pierwszym przypadku określany będzie czas trwania załamka, a także amplituda sygnału. W przypadku pozostałych zmiennych – badanym parametrem będzie jedynie czas trwania. Wyznaczenie powyższych parametrów sygnału pozwoli na zrozumienie metodyki pomiaru EKG oraz interpretacji otrzymanych danych.

Podczas analizy sygnału należy pamiętać o kluczowych pojęciach opisu sygnału EKG (Rys. 4):

1. *Linia izoelektryczna* – która jest poziomą linią odpowiadającą fazie, w której w sercu nie rozchodzi się fala pobudzenia.
2. *Załamek* (*ang. wave*) – odchylenie od linii izoelektrycznej w kierunku dodatniej (załamek dodatni) lub ujemnej amplitudy (załamek ujemny).

P – związany z depolaryzacją przedsionków

Q

R

S

T – związany z repolaryzacją komórek

} zespół QRS odpowiada depolaryzacji komórek serca

3. *Odcinek* (*ang. segment*) – to czas trwania linii izoelektrycznej pomiędzy kolejnymi załamekami.

PQ (czasami nazywany **PR**) – określający czas, przez który węzeł przedsionkowo-komorowy przewodzi sygnał depolaryzacji

ST – wskazuje czas, w jakim zachodzi wczesna repolaryzacja komórek

TP – to linia izoelektryczna, w czasie trwania której serce nie wykazuje aktywności elektrycznej

4. *Odstęp* (*ang. interval*) – to sumaryczny czas trwania załameków i odcinków

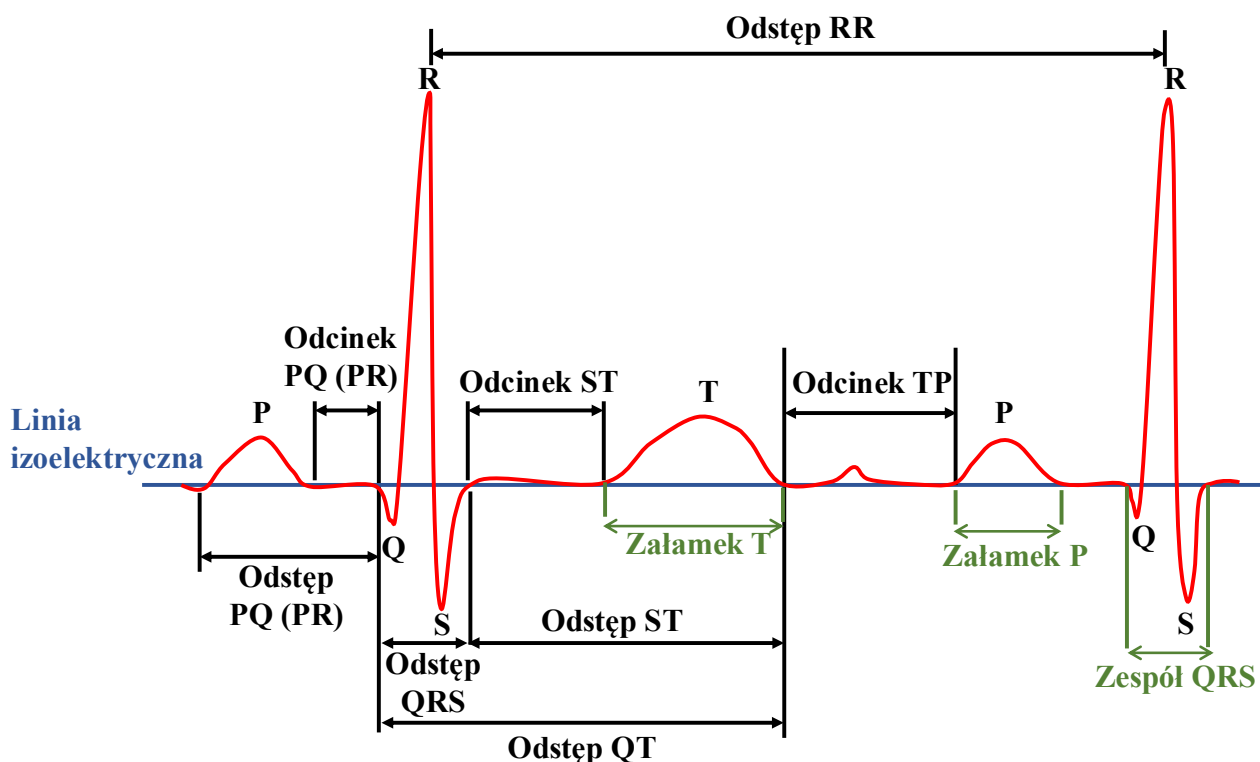
PQ (czasami nazywany **PR**) – określa czas przewodzenia depolaryzacji, od węzła zatokowo-predsionkowego do węzła przedsionkowo-komorowego

QT – określa jak długo trwa potencjał czynnościowy komórek, czyli okres depolaryzacji i repolaryzacji komórek łącznie

ST – związany z czasem łącznie wolnej oraz szybkiej repolaryzacji komórek (faza 2 i 3 repolaryzacji, patrz wyżej)

RR – określający okres między kolejnymi załamekami R

Należy zauważyć, że nomenklatura jest w tym przypadku kluczowa, ponieważ odcinki i odstępy nazywane w ten sam sposób, oznaczają całkowicie odmienne wartości i nie należy ich ze sobą mylić.



Rysunek 4 Oznaczenie poszczególnych załameków, odcinków i odstęgów w zapisie EKG

Ciekawostka

EKG wykorzystuje się nie tylko w medycynie ludzkiej. Jest powszechnie stosowane w weterynarii, a sygnał EKG można badać nawet u żółwi, węży, słoni, a nawet wielorybów.

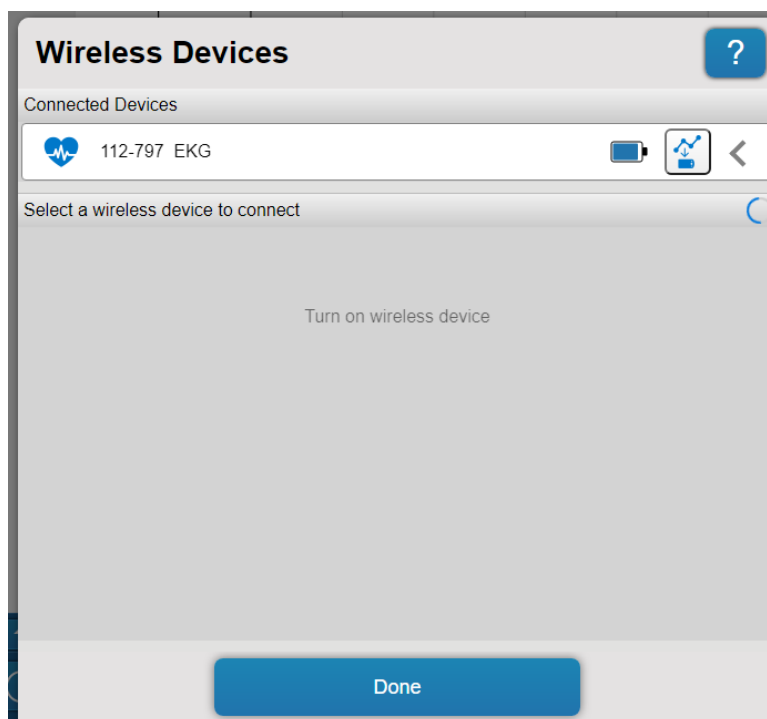
EKG może przyjąć także odwrócony sygnał (lustrzane odbicie). Dzieje się tak w przypadku rzadkiej, wrodzonej choroby związanej z rozwojem serca po prawej stronie klatki piersiowej.

WYKONANIE ĆWICZENIA**Ćwiczenie B14: Analiza biofizycznych właściwości sygnału w EKG**

POTRZEBNE WYPOSAŻENIE
• Komputer z oprogramowaniem „SPARKvue”
• Aparat EKG
• Samoprzylepne jednorazowe elektrody
• Zestaw połączeń (<i>krokodylki</i>)

Przygotowanie komputera – nie zapisuj zmian w plikach (DON'T SAVE)

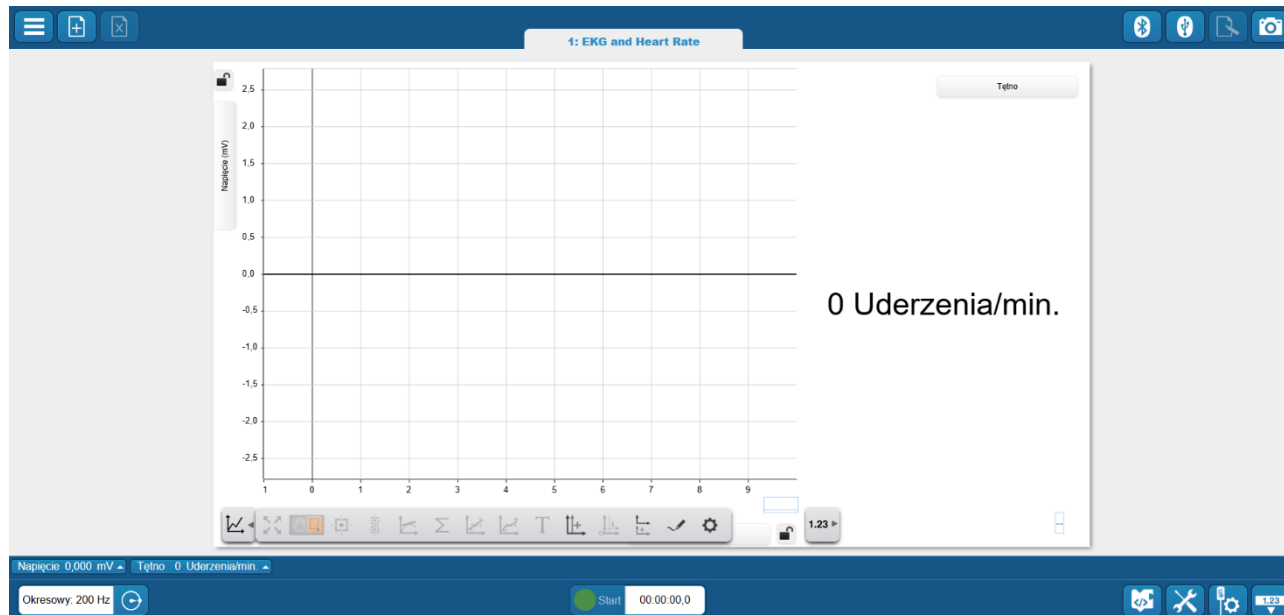
1. Włącz zasilanie stołu (patrz deska rozdzielcza stołu – przy Twojej lewej nodze, gdy siedzisz na wprost komputera) – przekręć czerwoną „gałkę” w kierunku strzałek (powinna wyskoczyć), przekręć kluczyk i puść. Włącz komputer.
2. Automatycznie uruchomi się system operacyjny *Windows*. Zaloguj się, naciskając ikonę użytkownika **B14**. Włącz zasilanie czujnika: PASCO EKG. Czujnik wyłącza się, gdy jest nieużywany. W razie niskiego poziomu naładowania baterii czujnika, podłącz go kablem bezpośrednio do komputera. Na środku pulpitu znajduje się skrót B14 – uruchamia program „SPARKvue”. Rozwiń okno do pełnego ekranu.
3. Naciśnij ikonę Bluetooth (prawy górny róg okna). Podłącz czujnik **EKG** (112-797 EKG) wybierając go w oknie urządzeń. Po prawidłowym dodaniu kliknij „Gotowe”. Prawidłowe podłączenie czujników przedstawia rysunek 5. **Innych czujników nie podłączaj!**



Rysunek 5 Okno połączenia bezprzewodowego czujnika EKG Pasco

Okno ćwiczenia B14

Okno podstawowe „EKG and Heart Rate” (Rys. 6) zawiera przyciski sterowania oraz wykres zależności napięcia (mV) od czasu (s).



Rysunek 6 Podstawowe okno pomiarowe „EKG and Heart Rate”.

Przygotowanie układu pomiarowego

1. Wybranie jednej chętnej osoby z grupy, będącej ochotnikiem podczas ćwiczenia i której EKG i tętno będzie analizowane w dalszej części ćwiczenia.
2. Rozpoczęcie pomiarów: w tym celu przygotuj wewnętrzne części rąk i naklej - na prawej ręce elektrodę samoprzylepną 2 cm nad linią nadgarstka, a drugą 2 cm poniżej zgięcia przedramienia. Trzecią elektrodę samoprzylepną naklej na lewej ręce, 2 cm poniżej zgięcia przedramienia.

3. Sugerując się rysunkiem na aparacie EKG, przyłącz ostrożnie uściski (krokodylki) do elektrod – **czerwony** do **elektrody dodatniej na lewej ręce**, **zielony** do **elektrody ujemnej w zgięciu prawej ręki** i **czarny** do **elektrody referencyjnej na prawym nadgarstku**. W razie konieczności, popraw izolację krokodylków, w taki sposób, żeby ich powierzchnia nie stykała się bez gumowego opłotu ze skórą.
4. Ułóż ręce swobodnie przed sobą i oddychaj spokojnie.
5. Ważne – nie wstrzymuj oddechu, staraj się oddychać normalnym, miarowym rytmem, nie staraj się wpływać na odczyt EKG.

Przebieg i rejestracja pomiarów

Pomiar EKG i tętna

1. Podczas eksperymentu ręce mogą znajdować się na blacie stołu lub być swobodnie położone na udach.
2. Poczekaj 1 minutę w celu ustabilizowania się rytmu serca.
3. Naciśnij zielony przycisk „START” (gdy jest aktywne zbieranie danych wyświetla się czerwony kwadrat).
4. Zakończ pomiar manualnie naciskając czerwony kwadrat „STOP”. Pomiar powinien trwać na tyle długo, tak aby otrzymać sygnał EKG w miarę stabilny, powtarzalny, a tętno wskazywało na stan spoczynku (50-90 uderzeń na minutę).

Analiza danych

1. Na podstawie zarejestrowanych zależności napięcia od czasu podczas pomiaru EKG i tętna w stanie spoczynku, wybierz zakres ok. 3 cykli pracy serca (3 wysokie piki zespołu QRS) w miejscu, w którym praca serca wydaje się być najbardziej powtarzalna.
2. Wykorzystaj przycisk zaznaczania obszaru (ikona ) , a następnie po zaznaczeniu 3 cykli pracy serca naciśnij przycisk „Scale to fit” (ikona ) do dopasowania otrzymanych danych do wyświetlanego obszaru okna.
3. W celu poprawy czytelności wykresu można go wygładzić, poprzez kliknięcie na osi Y (Voltage), a następnie w panelu po prawej stronie wybranie opcji **User-entered** oraz **Smoothed Voltage (mV)**. Następnie kliknięcie lewym przyciskiem myszy na oś X (Time), umożliwi odpowiednie dostosowanie (rozciągnięcie) zakresu tej osi.
4. Z wyselekcjonowanego obszaru wyników wybierz jeden dowolny cykl pracy serca, a następnie korzystając z narzędzia „Współrzędne” (ikona ) zaznacz wszystkie potrzebne miejsca, do określenia pomiarów z Tabeli pomiarowej. Są to **załamki/zespół**, **początki i końce odcinków** oraz **początki i końce odstępów** (posłuż się w tym celu Rys. 4).
5. Dodaj również oznaczenie współrzędnych załamka R kolejnego cyklu pracy serca (t_k) w celu określenia parametrów czasu trwania odstępu RR, dzięki któremu możesz obliczyć także tętno.
6. Zapisz w tabeli czasy załamków/zespołu, odcinków i odstępów i wykonaj odpowiednie obliczenia. Porównaj uzyskane wyniki z danymi podanymi w Tabeli 1.
7. Oblicz tętno korzystając z czasu trwania odstępu RR i poniższego wzoru:

$$T_{RR} = \frac{60}{\Delta t_{RR}}$$

(jednostką tętna są uderzenia/minutę)

8. Oblicz także błąd względny tętna obliczony z odstępu RR do tętna uśrednionego wyświetlanego na ekranie komputera, z całego czasu pomiaru używając wzoru:

$$\delta = \frac{|T_{sr} - T_{RR}|}{T_{sr}} \times 100\%$$

Pytanie do dyskusji:

1. W jaki sposób wyglądałby wykres EKG, gdyby pracę serca obserwowano w odprowadzeniu aVR, które jest ustawione w kierunku prawego ramienia i widzi serce od tej strony?
2. Dlaczego repolaryzacja przedsionków nie jest widoczna w wykonanym zapisie EKG?
3. Czy repolaryzacja przedsionków w wykonanym zapisie EKG powoduje wzmocnienie czy osłabienie sygnału zespołu QRS?