

1.7. Pulsoksymetria. Część teoretyczna.

1. Nasycenie tlenem krwi tętniczej – parametr SpO_2

Prawidłowe funkcjonowanie organizmu człowieka wymaga dostarczania tlenu do różnych jego organów z właściwą szybkością. Tlen dyfundując z pęcherzyków płucnych rozpuszcza się w osoczu krwi tętniczej, płynącej przez kapilary płucne, gdzie jest wiązany przez hemoglobinę zawartą w czerwonych krwinkach. Przenoszenie przyłączonego w płucach tlenu i uwalnianie go w tkankach odbywa się przy udziale hemoglobiny - czerwonego barwnika krwi, białka zawartego w erytrocytach. Hemoglobina ma zdolność nietrwałego wiązania tlenu (przechodząc w oksyhemoglobinę). Hemoglobinę bez przyłączonej cząsteczki tlenu nazywa się deoksyhemoglobiną (deoksyHb), a hemoglobinę ze związanym tlenem nazywa się oksyhemoglobiną (oksyHb). Po uwolnieniu tlenu odtlenowana (zredukowana) hemoglobina wraca do płuc, a dwutlenek węgla, powstały w procesach spalania, przetransportowany przez krew w odwrotnym kierunku, do wnętrza pęcherzyka płucnego, a następnie do oskrzeli, tchawicy i krtani – wyprowadzany jest na zewnątrz. Dwutlenek węgla jest przenoszony częściowo przez erytrocyty ale głównie w postaci jonowej (HCO_3^-) przez osocze. Sprawność tego procesu jest określana za pomocą **stopnia utlenowienia czyli saturacji hemoglobiny tlenem i oznacza się symbolem SpO_2** .

Poziom saturacji krwi tlenem może ulegać bardzo szybkim zmianom, dlatego często w warunkach klinicznych konieczne jest ciągłe monitorowanie jego wartości.

2. Metoda pulsoksymetryczna.

2.1. Pulsoksymetr.

Obecnie produkowane pulsoksymetry, to nieinwazyjne, łatwe w użyciu i tanie urządzenia elektroniczne, które umożliwiają ciągłe monitorowanie **poziomu saturacji krwi (SpO_2)**. Pulsoksymetr składa się z sondy pomiarowej najczęściej umieszczanej na palcu pacjenta oraz z wyświetlacza prezentującego wynik w jednostkach procentowych (%). Urządzenie, prócz wartości saturacji, wyświetla dodatkowo wartość tętna a czasami także krzywą pletyzmograficzną.



<https://bestmedicalbrands.com/pulsoksymetr-astma-azs-pomiar-saturacji-tlenem-niewydolnosc-oddechowa>

Pulsoksymetria jest to nieinwazyjna metoda przezskórnego oznaczania wysycenia krwi tlenem za pomocą pulsoksymetru. Polega na zasadzie spektrofotometrycznego pomiaru wysycenia tlenem hemoglobiny, gdyż hemoglobina utlenowana i odtlenowana (zredukowana) wykazuje odmienne właściwości optyczne (w różny sposób absorbują promieniowanie).

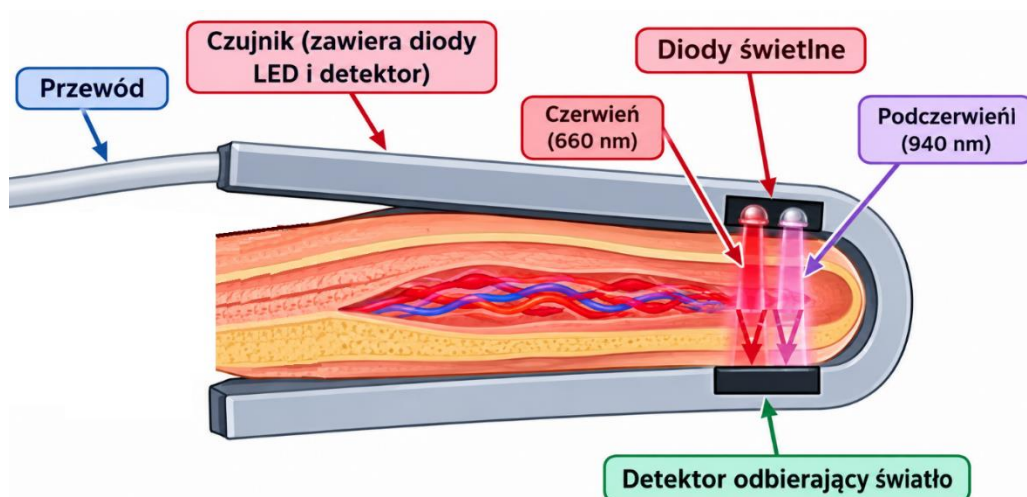
Wskazania do pulsoksymetrii:

- niewydolność oddechowa jawna lub jej podejrzenie,
- diagnostyka niedotlenienia płodu – ocena stanu płodu oraz jego rezerw czynnościowych,
- badanie przesiewowe zaburzeń oddychania w czasie snu (tzw. bezdech ,senny)
- monitorowanie stanu pacjenta:
 - w trakcie znieczulenia ogólnego i bezpośrednio po jego zakończeniu,
 - w trakcie stosowania tlenoterapii,
 - w trakcie każdego stanu ciężkiego.

Pozamedyczne zastosowania pulsoksymetrii:

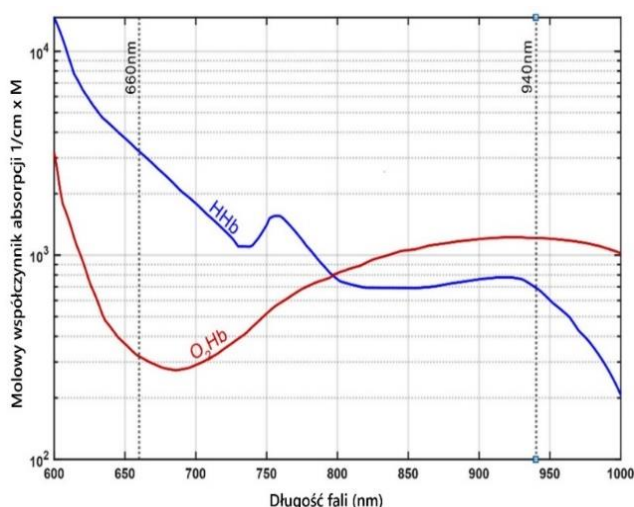
- monitoring kondycji pilota samolotu,
- monitoring podczas wspinaczek wysokogórskich

2.2. Zasady pomiaru. Zjawiska fizyczne leżące u podstaw pulsoksymetrii.



Pulsoksymetr wykorzystuje promieniowanie elektromagnetyczne (światło czerwone i promieniowanie podczerwone) do oceny stopnia saturacji krwi tlenem. Promieniowanie emitowane przez dwie diody przechodzi przez badany obiekt, najczęściej palec, gdzie jest absorbowane, i dociera do detektora. Otrzymany wynik absorpcji promieniowania w tkankach palca analizuje układ obliczeniowy pulsoksymetru.

Zasada działania pulsoksymetru opiera się na absorpcji światła przez hemoglobinę utlenowaną i zredukowaną. Stopień pochłaniania światła przez oba rodzaje hemoglobiny jest różny.



Hemoglobina odtlenowana (zredukowana) Hb silniej pochłania promieniowanie czerwone o długości fali 660 nm, a **hemoglobina utlenowana HbO_2** promieniowanie podczerwone o długości fali 940 nm.

Widma absorpcji hemoglobiny.

Pulsoksymetr mierzy, jak proporcjonalnie te fale są pochłaniane przez hemoglobinę: utlenowana hemoglobina pochłania więcej światła czerwonego, a nieutlenowana — podczerwonego. Porównując te wartości, urządzenie oblicza saturację, czyli procentowy stopień nasycenia krwi tlenem (SpO_2) oraz puls pacjenta (HR). Wartość SpO_2 teoretycznie może zmieniać się w zakresie od 0% do 100%, ale u zdrowych, dorosłych osób zawarta jest ona w przedziale od 94% do 100%.

Do pomiaru tej części promieniowania, która została przepuszczona przez tkanki wykorzystuje się fotodetektor. Część promieniowania, która nie została zaabsorbowana przez tkanki, jest przetwarzana przez detektor na sygnał elektryczny. Rejestrując go otrzymujemy tzw. krzywą pletyzmograficzną, której główną składową jest fala tętna.



Rys.2 Przykładowy przebieg otrzymywany na ekranie pulsoksymetru.

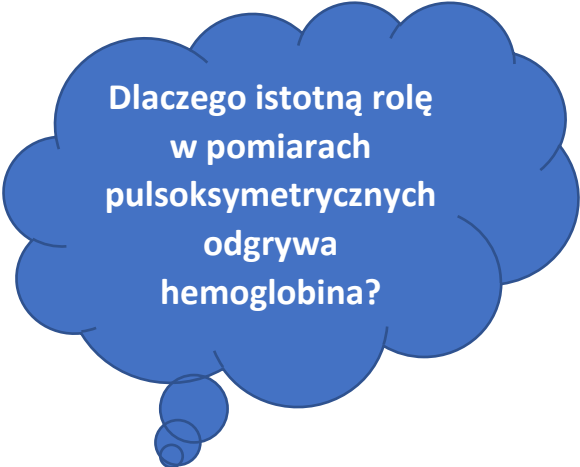
Co może
wpływać na
zaburzenia
poziomu
saturacji?

Wartość SpO_2 teoretycznie może zmieniać się w zakresie od 0% do 100%, ale u zdrowych, dorosłych osób zawarta jest ona w przedziale od 94% do 100%. Saturacja może się zmniejszać na skutek braku lub utrudnienia prawidłowej wentylacji płuc, blokady pęcherzykowo-wołniczkowej, zablokowania cząsteczek hemoglobiny przez tlenek węgla (np. w wyniku zatrucia tym gazem) lub też zmniejszeniem ciśnienia parcjalnego tlenu we wdychanym powietrzu, które może się zdarzyć podczas pobytu na znacznych wysokościach nad poziomem morza, gdzie obniżone jest ciśnienie atmosferyczne. Podwyższona wartość saturacji może się zdarzyć w przypadku, gdy pacjent jest poddawany tlenoterapii.

2.3. Zjawisko absorpcji w pomiarach pulsoksymetrycznych. Prawo Beera-Lamberta.

Zjawisko absorpcji (pochłaniania światła) stanowi fizyczny fundament działania pulsoksymetrii. Zasada działania pulsoksymetru opiera się na absorpcji światła przez hemoglobinę utlenowaną i zredukowaną. Stopień pochłaniania światła przez oba rodzaje hemoglobiny jest różny. Pomiar pulsoksymetryczny opiera się na zasadzie spektrofotometrycznego pomiaru wysycenia tlenem hemoglobiny, gdyż hemoglobina utlenowana i odutlenowana (zredukowana) wykazuje odmienne właściwości optyczne.

Matematyczną podstawą zjawiska jest **prawo Beera-Lamberta**, które mówi, że absorpcja światła jest wprost proporcjonalna do stężenia substancji pochłaniającej (hemoglobiny) oraz grubości warstwy, przez którą przechodzi światło. Pulsoksymetr emituje oba rodzaje światła, które przechodzi przez tkankę, a fotodetektor po drugiej stronie mierzy natężenie promieniowania, które nie zostało pochłonięte. Stosunek absorpcji obu długości fal (660 nm-Hb i 940 nm-HbO₂) pozwala wyznaczyć wartość saturacji krwi (SpO₂).

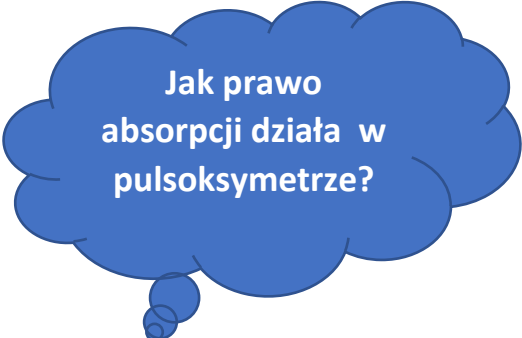


Dlaczego istotną rolę w pomiarach pulsoksymetrycznych odgrywa hemoglobina?

Hemoglobina jest chromoforem, czyli substancją zdolną do absorpcji promieniowania elektromagnetycznego. W krwi występują przede wszystkim dwie formy istotne dla pulsoksymetrii:

- Hb – hemoglobina odutlenowana (zredukowana),
- HbO₂ – hemoglobina utlenowana, czyli oksyhemoglobina.

2.3.1. Modyfikacja prawa absorpcji na potrzeby organizmów żywych.



Jak prawo absorpcji działa w pulsoksymetrze?

Klasyczny wzór na absorpcję (A) wygląda następująco:

$$A = \epsilon \cdot c \cdot d,$$

gdzie:

ϵ (molowy współczynnik absorpcji)-określa, jak mocno dana substancja pochłania światło o konkretnej długości fali. W pulsoksymetrii kluczowe jest to, że współczynnik jest **różny** dla hemoglobiny utlenowanej i odtlenowanej przy świetle czerwonym (660 nm) i podczerwonym (940 nm),

C (stężenie substancji)- czyli stężenie obu form hemoglobiny w krwi tętniczej,

d (grubość warstwy / droga światła)- w przypadku ludzkiego palca odległość między emitorem a detektorem jest stała, ale objętość krwi w naczyniach tętniczych zmienia się pulsacyjnie.

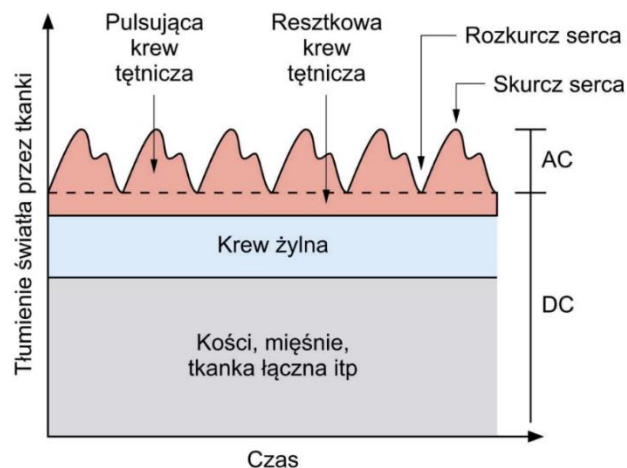
W teorii prawo Beera-Lamberta zakłada idealne warunki: roztwór jest jednorodny, a światło się nie rozprasza. Żywa tkanka (skóra, kość, mięśnie) mocno rozprasza światło, dlatego w pulsoksymetrii stosuje się tzw. **zmodyfikowane prawo Beera-Lamberta**.

Urządzenie radzi sobie z tym ograniczeniem poprzez podział sygnału na dwie składowe:

Dlaczego w przypadku pomiarów pulsoksymetrycznych prawo absorpcji musi być zmodyfikowane?

Składową stałą (DC): Tkanki stałe i krew żylna dają **stałą grubość (d) i stałe stężenie**. Ich absorpcja się nie zmienia.

Składową zmienną (AC): Z każdym uderzeniem serca do palca napływa nowa porcja krwi tętniczej. Powoduje to chwilowe **zwiększenie grubości warstwy absorbującej (d)** oraz **liczby cząsteczek hemoglobiny (c)** na drodze światła.



Pierwsza z nich reprezentuje zatem ogólną absorpcję tkanek, krwi żyłnej i niepulsumującej krwi tętniczej. Z kolei składowa zmienna reprezentuje pulsacyjną krew tętniczą.

Samo porównanie amplitud AC nie byłoby wystarczające, ponieważ różne osoby mają różną grubość palca, różną perfuzję i różną ilość tkanki. Dlatego stosuje się stosunek: $\frac{AC}{DC}$ dla każdej długości fali.

Klasyczny wzór na współczynnik R wykorzystywany w **pulsoksymetrii** do obliczania wysycenia tlenem krwi tętniczej (SpO₂) przedstawiony jest poniżej:

$$R = \frac{AC_{660}/DC_{660}}{AC_{940}/DC_{940}}$$

Dzielenie składowej zmiennej przez stałą (AC/DC) pozwala "skasować" wpływ tkanek stałych i wyizolować sygnał pochodzący wyłącznie z pulsującej krwi tętniczej.

Następnie uzyskany wynik R jest dopasowywany przez urządzenie do wewnętrznej krzywej kalibracyjnej, aby wskazać dokładny procent SpO₂.

2.4. Pomiar tętna za pomocą pulsoksymetru.

Pulsoksymetr mierzy tętno i wyświetla je na ekranie obok wyniku saturacji (najczęściej pod skrótem **PR** – *Pulse Rate* lub **HR** – *Heart Rate*).

W palcu znajdują się skóra, tkanka podskórna, kości, krew żylna, krew kapilarna, krew tętnicza. Większość tych struktur nie zmienia się istotnie w czasie pojedynczego cyklu serca. Natomiast podczas skurczu serca objętość krwi tętniczej w tkance zwiększa się. W związku z tym zmieniają się również długość i właściwości optyczne drogi, przez którą przechodzi światło.

Pulsoksymetr nie mierzy tętna mechanicznie (poprzez nacisk fali krwi na ścianę naczynia), lecz **optycznie**. Rejestruje on zmiany objętościowe krwi tętniczej (fotopletyzmografię), identyfikując składową zmienną sygnału świetlnego generowaną przez cykl skurczowo-rozkurczowy serca. Wyodrębnienie tego pulsującego sygnału (AC) jest warunkiem koniecznym do późniejszego obliczenia saturacji (SpO₂).



W jaki sposób
pulsoksymetr
kalkuluje tętno?

Procesor pulsoksymetru analizuje składową zmienną (AC) w funkcji czasu:

1. Wykrywa regularne **amplitudy i piki (wierzchołki) fali pletyzmograficznej**, które odpowiadają kolejnym rzutom krwi z lewej komory serca.
2. Mierzy interwały czasowe pomiędzy kolejnymi pikami (tzw. odstępy międzypulsowe).
3. Na podstawie częstotliwości występowania tych cykli w jednostce czasu, algorytm kalkuluje **częstość tętna wyrażoną w uderzeniach na minutę (bpm)**.

2.5. Czynniki zewnętrzne oraz fizjologiczne mogące zaburzać prawidłowy pomiar saturacji.

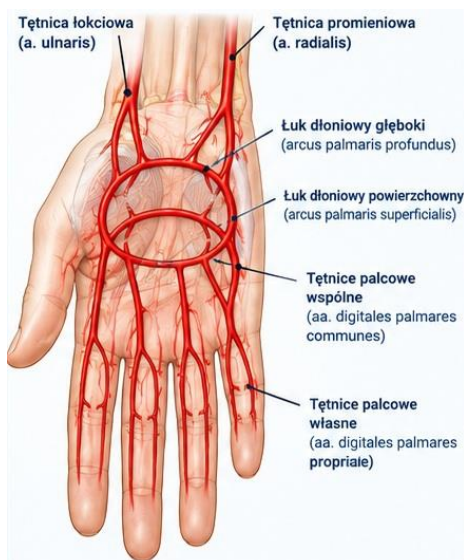
Ograniczenia pulsoksymetrii:

1. **Lakier do paznokci:** Niebieski, czarny lub zielony – fałszywie niskie wartości SpO₂, lakiery czerwone nie wpływają na wysycenie.
2. **Sztuczne oświetlenie:** Silne, bezpośrednie oświetlenie (np. lampy operacyjne, bezpośrednie światło słoneczne) padające na czujnik może zaburzyć pomiar.
3. **Nieprawidłowe założenie urządzenia:** Zbyt luźny pulsoksymetr, brudne palce lub założenie go na rękę, na której mierzone jest ciśnienie krwi.
4. **Ruch podczas pomiaru:** Drżenie rąk, poruszanie się uniemożliwiają uzyskanie stabilnego odczytu. Sytuacje w których pacjent ma dreszcze albo atak padaczkowy zaburzają odczyt. Badanie powinno być przeprowadzane w spokojnej atmosferze, ponieważ gwałtowne ruchy mogą uniemożliwić pomiar.
5. **Obrzęki** na ciele występujące w miejscu, gdzie mierzymy saturację: także powodują zaburzenia pomiaru. Gdy przykładowo umieszczamy sondę na opuchniętym palcu otrzymamy nieprawidłowy wynik, gdyż płyn, który zbiera się w miejscu obrzęku zmienia nam współczynnik absorpcji wiązki światła.

6. **Zimne dłonie i słabe krążenie (peryferyjna perfuzja):** Niska temperatura ciała, choroba Raynauda lub niedociśnienie powodują, że pulsoksymetr ma trudności z wykryciem tętna.
7. **Wysiłek fizyczny może zaburzać odczyty z pulsoksymetru,** głównie ze względu na ruch oraz zmiany fizjologiczne zachodzące w organizmie. Pulsoksymetr jest urządzeniem zaprojektowanym do pomiaru w spoczynku, a aktywność fizyczna wprowadza czynniki zakłócające jego pracę.
8. **Skrajne pozycje ciała:** Ekstremalne ułożenie ciała (np. Trendelenburga – głową w dół) może zaburzać przepływ krwi i prowadzić do błędnych odczytów.
9. **Zatrucie tlenkiem węgla:** Gaz ten ma zdolność do wiązania się z hemoglobina i tworzenia tzw. hemoglobiny tlenkowęgłowej, której pulsoksymetr nie jest w stanie odróżnić od prawidłowej hemoglobiny. To powoduje zawyżenie pomiaru i grozi niewykryciem groźnego niedotlenienia.
10. **Stany silnego wstrząsu pourazowego:** Pomiary pulsoksymetrem dają także zafałszowane wyniki w stanach silnego wstrząsu pourazowego (gdy organizm zmniejsza przepływ krwi w kończynach) i hipotermii.
11. **Jednoczesny pomiar ciśnienia:** Wykonując pomiar SpO₂ (założony czujnik na palec) należy pamiętać, aby jednocześnie nie wykonywać pomiaru ciśnienia tętniczego krwi na tej samej kończynie – podczas "pompowania" mankieta ciśnieniomierza pulsoksymetr fałszywie wskaże niskie wartości SpO₂.

2.6. Test Allena.

Test Allena jest badaniem mającym na celu określić prawidłowość unaczynienia tętniczego ręki, czyli drożność tętnic promieniowej i łokciowej oraz tętniczego łuku dłoniowego, łączącego obie tętnice.



Ręka jest zaopatrywana w krew głównie przez tętnicę promieniową i tętnicę łokciową. Obie tętnice tworzą w dłoni powierzchowny i głęboki łuk dłoniowy, które zapewniają tzw. krążenie oboczne. Dzięki temu, gdy jedno naczynie jest zablokowane, drugie może (w warunkach prawidłowych) zaopatrzyć w krew całą dłoń.

2.6.1. Wykonanie testu Allena.

Jak przebiega test Allena?

1. **Opróżnienie z krwi:** Pacjent zaciska dłoń w pięść na około 30 sekund, co wyciska krew z naczyń krwionośnych.
2. **Uciśnięcie:** Badający mocno uciska kardiologicznie/palcami obie tętnice (promieniową i łokciową) na przedramieniu powyżej nadgarstka.
3. **Bładość:** Pacjent prostuje palce – dłoń powinna być biała, ponieważ odcięto dopływ świeżej krwi.
4. **Zwolnienie nacisku:** Badający zwalnia ucisk tylko jednej tętnicy (np. łokciowej) i mierzy czas powrotu naturalnego zabarwienia dłoni. Następnie test powtarza się dla drugiej tętnicy.

1 Ucisk obu tętnic  Uciskamy jednocześnie tętnicę promieniową i łokciową w okolicy nadgarstka. Student zaciska i następnie otwiera pięść – dłoń powinna zblednąć.	2 Utrzymanie ucisku na tętnicy promieniowej i zwolnienie ucisku na tętnicy łokciowej  Nadal uciskamy tętnicę promieniową, a zwalniamy ucisk na tętnicy łokciowej. Obserwujemy powrót zabarwienia skóry dłoni i/lub sygnału pulsoksymetrycznego.	3 Ocena powrotu zabarwienia  Szybki powrót różowego zabarwienia wskazuje na drożność krążenia obocznego (łuków dłoniowych). Opóźniony lub brak powrotu wymaga dalszej oceny klinicznej.
--	---	--

Kiedy przeprowadza się test Allena?

Test Allena wykonuje się najczęściej przed zabiegami medycznymi, które wymagają nakłucia lub cewnikowania tętnicy promieniowej (np. przed pobraniem krwi gazometrycznej czy koronarografią), aby upewnić się, że w razie uszkodzenia jednego naczynia, drugie samodzielnie poradzi sobie z ukrwieniem dłoni.

Pomiar pulsoksymetryczny a test Allena

Przeprowadzenie testu Allena ma całkowicie kluczowy i gwałtowny wpływ na wskazania pulsoksymetru. Odcięcie dopływu krwi do dłoni powoduje natychmiastowe zmiany w odczytach.

Aby pulsoksymetr podał prawidłowy wynik saturacji, w palcu musi być zachowany odpowiedni przepływ krwi (perfuzja). Jeśli krążenie oboczne dłoni (badane testem Allena) jest skrajnie upośledzone, pulsoksymetr na tej dłoni może pokazywać błędne lub zaniżone wartości.