

AKADEMIA WYCHOWANIA FIZYCZNEGO  
IM. POLSKICH OLIMPIJCZYKÓW WE WROCŁAWIU

**JOANNA MENCEL**

# **BIOFEEDBACK**

skrypt dla studentów fizjoterapii

WROCŁAW 2024

## KOMITET WYDAWNICZY

Wojciech Cieśliński  
Gabriel Łasiński  
Krzysztof Maćkała  
Jarosław Marusiak  
Eugenia Murawska-Ciałowicz  
Andrzej Pawtucki  
Małgorzata Sekułowicz  
Tomasz Sipko  
Sławomir Winiarski (przewodniczący)

## KOREKTA

Beata Irzykowska  
Joanna Malec

## SKŁAD

Beata Irzykowska

© Copyright by Wydawnictwo AWF Wrocław 2024

ISBN 978-83-64354-95-3



Wydawnictwo Akademii Wychowania Fizycznego  
im. Polskich Olimpijczyków we Wrocławiu  
51-684 Wrocław, al. I.J. Paderewskiego 35  
[www.awf.wroc.pl](http://www.awf.wroc.pl), [wydawnictwo@awf.wroc.pl](mailto:wydawnictwo@awf.wroc.pl)  
Wydanie I

*Certyfikat jakości na zgodność z PN-EN ISO 9001:2015, nr PW-15105-22L*

**prawolubni**

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw, jakie im przysługują. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Ale nie publikuj jej w internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. A kopiując jej część, rób to jedynie na użytek osobisty. Szanujmy cudzą własność i prawo. Więcej na [www.legalnakultura.pl](http://www.legalnakultura.pl)

Polska Izba Książki

# SPIS TREŚCI

## Od Autorki, 4

### **1. Biofeedback – wprowadzenie do stosowanej terminologii, 6**

- 1.1. Definicje biofeedbacku, 6
- 1.2. Trening (a nie terapia) biofeedback, 7
- 1.3. Osoba uczestnicząca w treningu biofeedback, 7
- 1.4. Cel biofeedbacku: poprawa zdrowia vs. poprawa „wydajności” organizmu, 7
- 1.5. Urządzenia stosowane w biofeedbacku, 8
- 1.6. Rola fizjoterapeuty w treningu biofeedback, 9
- 1.7. Uczenie się, informacja zwrotna i warunkowanie instrumentalne, 11

### **2. Klasyfikacja biofeedbacku ze względu na mierzone parametry, 14**

### **3. Biologiczne sprzężenie zwrotne jako ingerencja w czynność autonomicznego układu nerwowego, 16**

### **4. HRV-biofeedback jako jedna z podstawowych modalności biofeedbacku fizjologicznego, 18**

- 4.1. Fizjologiczne mechanizmy kontrolujące poziom HRV, 19
- 4.2. Rekomendowane protokoły i efekty treningów, 21

### **5. EMG-biofeedback, 23**

- 5.1. Rekomendowane protokoły i efekty treningów, 25

### **6. Neurofeedback, czyli podgrupa treningów biofeedbacku wpływających na czynność mózgu, 26**

- 6.1. EEG-biofeedback jako najczęściej stosowany rodzaj neurofeedbacku, 26
- 6.2. Rekomendowane protokoły, 29

### **7. Biofeedback oparty na dowodach naukowych, 31**

### **8. Zastosowanie nowoczesnych technologii w fizjoterapii, 37**

- 8.1. Rozwój biofeedbacku, 37
- 8.2. Wirtualna rzeczywistość, 38
- 8.3. Interfejsy człowiek–maszyna, 40

## Bibliografia, 41

## OD AUTORKI

Celem niniejszego skryptu jest przybliżenie obiecującego w wielu obszarach zastosowania biofeedbacku. Biofeedback oznacza biologiczne sprzężenie zwrotne i jest rodzajem treningu, który dzięki obiektywnym pomiarom wykonywanym za pomocą urządzeń elektronicznych umożliwia uczenie się ingerowania w różne procesy toczące się w ludzkim ciele – w ciele osoby uczestniczącej w treningu. Podstawowe kwestie związane z definicją, terminologią i ważnymi aspektami treningu zostały wyjaśnione w pierwszym rozdziale. Czytelnik znajdzie w nim także informacje o roli osoby prowadzącej trening biofeedback, którą nazywam fizjoterapeutą. Drugi, krótki, rozdział dotyczy podziału biofeedbacku na fizjologiczny i biomechaniczny. Mechanizm dotyczący możliwości ingerowania w przebieg automatycznych procesów ciała człowieka, który stanowi podłoże wielu treningów biofeedbacku, omawiam w rozdziale trzecim. Wybrane rodzaje biofeedbacku fizjologicznego opisuję w rozdziałach czwartym, piątym i szóstym. Rozdział siódmy obejmuje problematykę biofeedbacku opartego na faktach naukowych. Przedstawione tu treści korespondują z modelem medycyny opartej na dowodach naukowych, czyli *evidence-based medicine* (EBM). Mam nadzieję, że pozwolą one także wyjaśnić, dlaczego nie podaję konkretnych rozwiązań treningowych biofeedbacku w odniesieniu do różnych jego odbiorców. W myśl sentencji: „In theory there is no difference between theory and practice – in practice there is” nie opisuję też ważnych zagadnień praktycznych. Czytelnik nie pozna tu więc sposobów mocowania elektrod do skóry czy sprawdzania impedancji przed treningiem biofeedbacku bazującym na sygnale elektroencefalograficznym. W ostatnim rozdziale koncentruję się na kwestiach związanych z zastosowaniem nowoczesnych technologii w fizjoterapii, w tym m.in. wirtualnej rzeczywistości, która należy do biofeedbacku biomechanicznego. Jeden z podrozdziałów został poświęcony interfejsom człowiek–maszyna.

Dogłębna wiedza z zakresu fizjologii i patofizjologii, a także wiedza na temat stosowanych w biofeedbacku urządzeń, rejestrowanych sygnałów i ich analizy stanowi podstawę skutecznego treningu. Jego skuteczność zaś niezwykle motywuje do dalszej pracy.

Biofeedback postrzegam jako most łączący świat nauki i **teorii**, oparty na obiektywnych pomiarach, wystandaryzowanych czujnikach i urządzeniach oraz liczbach, ze światem **praktyki**, odnoszącym się do konkretnych osób i ich potrzeb. Z tej perspektywy biofeedback wydaje mi się niezwykle ciekawy i ważny.

Niniejszy skrypt jest skierowany przede wszystkim do studentów fizjoterapii, chociaż fizjoterapeuci nie są jedynymi osobami, które mogą prowadzić treningi biofeedbacku.

*Joanna Mencil*

*Dziękuję Rodzicom za wprowadzenie mnie w nauczycielski świat.*

# 1

## BIOFEEDBACK – WPROWADZENIE DO STOSOWANEJ TERMINOLOGII

### 1.1. Definicje biofeedbacku

Termin „biofeedback” [wym. biofidbek] składa się z dwóch członów. Przedrostek *bio-* oznacza *biologiczny, dotyczący organizmu żywego*, słowo *feedback* można przetłumaczyć jako *informacja zwrotna, sprzężenie zwrotne*.

Biofeedback, czyli biologiczne sprzężenie zwrotne, to rodzaj treningu, w którym wykorzystuje się urządzenia elektroniczne, aby dostarczyć osobie trenowanej informacji o jej wybranych parametrach fizycznych (fizjologicznych lub biomechanicznych) w celu poprawy jej zdrowia, jakości życia czy optymalizacji czynności badanych „funkcji” organizmu.

Informacja zwrotna uzyskiwana podczas treningu stanowi dodatkową informację (obok tej zapewnionej poprzez impulsacje czuciowe przewodzone z receptorów do ośrodkowego układu nerwowego), dlatego bywa nazywana informacją zwrotną rozszerzoną lub zewnętrzną (Malik i Dua, 2022). Biofeedback umożliwia trenowanej osobie uzmysłowienie sobie i poznanie nieświadomych (automatycznych) procesów fizjologicznych, co daje jej możliwość uczenia się, jak ingerować w ich przebieg. Innymi słowy, biofeedback umożliwia naukę zmieniania czynności fizjologicznej/funkcji organizmu lub zachowania poprzez wykorzystywanie różnego rodzaju urządzeń elektronicznych. Tego rodzaju trening jest zaliczany do metod z grupy interwencji „umysł–ciało” (ang. *mind-body training*, MBT, lub *mind-body intervention*, MBI) (Wahbeh i wsp., 2008), które pozwalają na uczenie się modyfikowania określonych, własnych wskaźników fizjologicznych w celu uzyskania poprawy zdrowia fizycznego, psychicznego, emocjonalnego i duchowego (Frank i wsp., 2010).

**Długoterminowym celem biofeedbacku jest nabycie umiejętności kontrolowania wybranych procesów fizjologicznych bez konieczności stosowania urządzeń.**

W przytoczonych definicjach warto zwrócić uwagę na kluczowe słowa, do których należą: trening (i jego cel) – odnoszący się do osoby w nim uczestniczącej oraz urządzenia elektroniczne.

W związku z tym, że niniejszy skrypt został napisany z myślą o fizjoterapeutach, pochylił się także nad rolą osoby prowadzącej biofeedback.

## 1.2. Trening (a nie terapia) biofeedback

Obecnie coraz częściej zwraca się uwagę na to, że biofeedback jest treningiem, a nie terapią (Frank i wsp., 2010). Wynika to z podstawowej cechy biofeedbacku – udział w nim jest aktywnym procesem. Osoba poddana biofeedbackowi powinna czynnie angażować się w przebieg każdej sesji treningowej. Jest to główny warunek uzyskania skutecznego biofeedbacku. Z punktu widzenia neurofizjologii zaangażowanie w trening dotyczy pewnych właściwości układu nerwowego osoby trenowanej, która w trakcie zadań powinna przejawiać wysoki poziom motywacji, uwagi i skupienia. Wśród innych cech skutecznego biofeedbacku zalicza się czas trwania pojedynczego treningu i liczbę treningów (Fournié i wsp., 2021).

W przeciwieństwie do treningu, terapia (np. farmakologiczna), która może prowadzić do uzyskania tych samych celów co biofeedback (np. zmniejszenia bólów głowy), jest rozumiana jako proces bierny (np. wymagający „jedynie” przyjęcia leku).

## 1.3. Osoba uczestnicząca w treningu biofeedback

Ze względu na najważniejszy warunek skutecznego treningu biofeedback, czyli zaangażowanie, z metody tej nie powinien korzystać każdy. Warto o tym pamiętać, krytycznie analizując założenia autorów, którzy podkreślają, że nie ma bezwzględnych przeciwwskazań do uczestniczenia w biofeedbacku (Yucha i Montgomery, 2008; Frank i wsp., 2010; Malik i Dua, 2022). Osoby, z którymi nie ma kontaktu, ze znaczną i głęboką niepełnosprawnością intelektualną oraz najmłodsze dzieci z całą pewnością nie powinny być poddawane biofeedbackowi. Choć jest on bezpieczny i właściwie pozbawiony skutków ubocznych (Yucha i Montgomery, 2008), to jednak w tym przypadku należy zakładać, że nie przyniesie oczekiwanych rezultatów.

## 1.4. Cel biofeedbacku: poprawa zdrowia vs. poprawa „wydajności” organizmu

Kto może i powinien być uczestnikiem treningu biofeedback? Odpowiedź nie jest prosta, ponieważ biofeedback znajduje coraz szersze zastosowanie. Jest to związane zarówno z coraz większą liczbą publikacji naukowych, a zatem coraz szerszą wiedzą na jego temat, dostępnością kursów i szkoleń, jak i z rozwojem wykorzystywanych urządzeń. Z mojego punktu widzenia uczestników biofeedbacku można najogólniej podzielić na dwie grupy: osoby z chorobami, dysfunkcjami czy zaburzeniami i osoby zdrowe. W pierwszym przypadku celem biofeedbacku będzie poprawa

zdrowia, w drugim – poprawa wyników w nauce, pracy czy sporcie poprzez poprawę i/lub optymalizację czynności wybranego układu (lub układów) fizjologicznego bądź kontroli organizmu, co często nazywane jest poprawą jego „wydajności”.

## 1.5. Urządzenia stosowane w biofeedbacku

Jedna z definicji biofeedbacku, opracowana przez członków Stowarzyszenia Psychofizjologii Stosowanej i Biofeedbacku (The Association for Applied Psychophysiology and Biofeedback, AAPB) odnosi się dość szczegółowo do wykorzystywanych urządzeń. Zgodnie z nią podczas treningu biofeedback precyzyjne urządzenia mierzą określoną czynność, np. fizjologiczną, taką jak: częstość skurczów serca, czynność oddechowa, temperatura skóry, czynność bioelektryczna mięśni szkieletowych czy wreszcie czynność kory mózgu. Rejestrowane sygnały podlegają analizie i w postaci przystępnej informacji zwrotnej są jak najszybciej (z minimalnym opóźnieniem) przekazywane osobie poddanej treningowi. Odbywa się to w sposób ciągły i dokładny. Prezentacja informacji zwrotnych w połączeniu ze zmianą myślenia, emocji i zachowania osoby trenowanej wspiera pożądane zmiany fizjologiczne, które prowadzą do osiągnięcia celu treningu. Z biegiem czasu zmiany te mogą utrzymywać się bez konieczności podłączania urządzenia.

Warto w tym miejscu jeszcze raz podkreślić rolę urządzeń w treningu biofeedback. Ze względu na to, że biofeedback polega na uczeniu się oddziaływania na procesy, które w naturalnych warunkach nie są świadomie analizowane, wymaga on używania specjalistycznej aparatury do rejestrowania i przedstawiania tych procesów. Zadaniem urządzeń przeznaczonych do biofeedbacku jest zatem zapewnienie pomiaru wybranego parametru lub parametrów, umożliwienie przeprowadzenia szybkiej analizy rejestrowanego sygnału (parametru fizycznego; Malik i Dua; 2022) i (najczęściej) przekształcenie go w użyteczną, możliwie prostą informację zwrotną. Sporadycznie informacje o parametrach nie wymagają przekształcenia, czyli wyświetlane są w sposób bezpośredni, bez większej ingerencji w „surowe” sygnały. Przykładem może być tu obraz struktury mięśni dna miednicy (w spoczynku i podczas ich wolicjonalnego skurczu) w treningu biofeedback bazującym na obrazowaniu ultrasonograficznym (USG). Pomiar parametrów odbywa się za pomocą odpowiednich czujników. Analizę sygnału, polegającą na obliczeniach wykonywanych w czasie rzeczywistym, przeprowadza oprogramowanie przeznaczone do konkretnego rodzaju biofeedbacku. Przeanalizowany sygnał dzięki funkcjom stosowanego oprogramowania ulega najczęściej przekształceniu w informację zwrotną dostarczaną osobie trenowanej.



Wśród informacji zwrotnych wykorzystuje się przeważnie informacje wzrokowe. Może być to np. zmiana grafiki czy wielkości słupków na wykresie (które odpowiadają badanym procesom) wyświetlanych na monitorze obserwowanym przez osobę trenowaną. Innym rodzajem informacji zwrotnej są informacje słuchowe, do których zalicza się np. zmiany tonu lub głośności muzyki oddające efekt podejmowanego treningu/wysiłku. Dzięki zastosowaniu dodatkowych urządzeń mocowanych na ciele osoby poddanej treningowi istnieje też możliwość dostarczania informacji dotykowych, co może mieć szczególne znaczenie np. w pracy z osobą mającą dużą wadę wzroku. Słuchowe i dotykowe informacje zwrotne mogą być dostarczane niezależnie, jednak częściej towarzyszą informacji wzrokowej, stanowiąc jej uzupełnienie. Z reguły są generowane podczas treningu biofeedback z wykorzystaniem wirtualnej rzeczywistości (patrz rozdz. 8.2). Zgodnie z warunkowaniem instrumentalnym (patrz rozdz. 1.7), wykorzystywanym w biofeedbacku, w trakcie treningu mogą pojawiać się pewne komunikaty stanowiące rodzaj nagrody za poprawnie wykonane zadanie. Przyjmują one postać np. dodatkowych bodźców słuchowych (pojedynczy ton, krótka melodia, fanfary) bądź dodatkowych bodźców wzrokowych (zielona lampka na monitorze). Podsumowaniem treningu jest obiektywny wynik końcowy, udostępniany także, dzięki stosowanym urządzeniom i oprogramowaniom, osobie prowadzącej trening.



## 1.6. Rola fizjoterapeuty w treningu biofeedback

Ogólnoświatowe standardy dotyczące treningów biofeedback zostały opracowane w 2013 r. przez członków Komitetu ds. Standardów Stowarzyszenia Psychofizjologii Stosowanej i Biofeedbacku. Są one dostępne na stronie internetowej AAPB ([https://aapb.org/Standards\\_for\\_Performing\\_Biofeedback](https://aapb.org/Standards_for_Performing_Biofeedback)). Przekierowanie do strony jest możliwe także za pomocą kodu QR. Zgodnie z tymi wytycznymi kluczowe dla osób prowadzących treningi biofeedback są odpowiednie szkolenia. Główną jednostką certyfikującą i ustalającą minimalne standardy szkoleniowe jest Biofeedback Certification International Alliance (BCIA). Członkowie AAPB, uznanej za najważniejszą organizację zajmującą się biofeedbackiem, podkreślają, że osoby świadczące usługi biofeedback muszą stosować się do norm określonych przez ich macierzyste organizacje zawodowe oraz do obowiązujących regulacji prawnych. W Polsce wiele aspektów prawnych dotyczących biofeedbacku pozostaje nieuregulowanych (Szewczyk i wsp., 2016; Nowak-Gruca, 2018). Warto jednak znać dwa rodzaje odpowiedzialności cywilnej, które obejmują fizjoterapeutów prowadzących biofeedback bazujący na sygnale elektroencefalograficznym. Chodzi tu o odpowiedzialność cywilną deliktową oraz kontraktową. Szewczyk i wsp. (2016) zwracają uwagę także

na rodzaj umowy zawieranej między fizjoterapeutą a osobą uczestniczącą w treningu, niezależnie od formy umowy (pisemnej lub ustnej). Tego typu kontrakt nosi nazwę umowy starannego działania i oznacza, że fizjoterapeuta nie zobowiązuje się do uzyskania konkretnego efektu treningu, a jedynie gwarantuje, że dołoży wszelkich starań, aby jego działania były prowadzone w należyty sposób – zarówno pod względem technicznym, jak i merytorycznym – zgodnie z aktualnym stanem wiedzy na temat danego sposobu oddziaływania, czyli danej modalności treningu biofeedback i stosowanego protokołu (protokół treningu reguluje szczegóły dotyczące treningu od miejsca mocowania czujników po czas jego trwania itd.). Odpowiedzialny fizjoterapeuta powinien zatem odbyć specjalistyczne szkolenie z biofeedbacku czy określonej jego modalności. W przeciwnym wypadku naraża się na ryzyko popełnienia błędu, za co może być pociągnięty do odpowiedzialności. Kwestie wybranych problemów prawnych związanych z prowadzeniem EEG-biofeedbacku (i odpowiedzialności) na gruncie polskich przepisów porusza także Nowak-Gruca (2018), do której artykułu odsyłam zainteresowanych.

Po odpowiednim przeszkoleniu biofeedback mogą stosować specjaliści wielu dziedzin. Nie powinno się go jednak traktować jako samodzielnej „terapii” ani nie może on służyć za jedyne narzędzie do stawiania diagnozy. Jest on raczej środkiem pomocniczym, który należy łączyć z innymi standardowymi interwencjami przeprowadzanymi przez doświadczonych klinicystów, fizjoterapeutów, terapeutów zajęciowych, pedagogów czy trenerów.

W związku z tym, że niniejszy skrypt powstał z myślą o studentach fizjoterapii (zatem przyszłych absolwentach tego kierunku), osobę prowadzącą trening biofeedback będę domyślnie nazywała fizjoterapeutą. Fizjoterapeuci posiadający odpowiednie umiejętności stanowią integralny i kluczowy element treningu biofeedback. W przypadku niektórych jego bardziej złożonych modalności do przeprowadzenia treningu niezbędni są także wykwalifikowani pracownicy techniczni. Rolą fizjoterapeuty w biofeedbacku jest dobranie odpowiednich czujników, w zależności od celu treningu. Nie musi to dotyczyć fizjoterapeutów po ukierunkowanym szkoleniu w wąskiej specjalizacji biofeedbacku, którzy oferują treningi wyłącznie z jednej modalności. Na przykład elektromiografia powierzchniowa jest częściej stosowana w schorzeniach układu ruchu, natomiast w przypadku dysfunkcji mięśni dna miednicy lepszy może się okazać biofeedback oparty na obrazie USG. Odpowiednie przygotowanie urządzeń, osoby trenowanej i prawidłowe przymocowanie czujników to kolejne zadanie fizjoterapeuty. Na podstawie właściwie dobranej do pacjenta/klienta modalności biofeedbacku (inaczej rodzaju; wiele modalności wskazują w kolejnym rozdziale) można przeprowadzić diagnostykę dotyczącą danego wskaźnika czy parametru. Istotnym elementem jest wskazanie w odniesieniu do konkretnej osoby podstawowo-

wego poziomu mierzonego parametru czy wskaźnika. W przypadku bardziej złożonych modalności krok ten może poprzedzać np. kontrola jakości rejestrowanego sygnału (analiza impedancji w biofeedbacku bazującym na sygnale elektroencefalograficznym) i ustalenie jego cech/wartości wyjściowych. Podczas treningu biofeedback fizjoterapeuta staje się nauczycielem, który ma wspomagać osobę poddaną treningowi w jej procesie uczenia się. Uczestnik biofeedbacku uczy się kontrolować dany parametr (a zatem w jakiej części swoje ciało) i proces ten trwa do momentu, gdy trenowane czynności zostaną zapamiętane i do ich wykonania nie będą już potrzebne urządzenia zewnętrzne. Ponieważ – zgodnie z zasadą uczenia się opartego na wykorzystywanym w biofeedbacku warunkowaniu instrumentalnym – uczenie się jest wspierane poprzez dostarczanie pozytywnej informacji zwrotnej, kolejne zadanie fizjoterapeuty polega na monitorowaniu tego procesu. Może temu służyć dodatkowy komputer, dzięki któremu fizjoterapeuta ma wgląd w mierzony parametr/wskaźnik, i oprogramowanie dedykowane danej modalności. Fizjoterapeuta ma wgląd nie tylko w przetworzoną, prostą informację, jaką widzi osoba uczestnicząca w treningu, ale także w rejestrowany sygnał, dzięki czemu rozumie, z czego wynika konkretny przebieg treningu (np. dlaczego wyświetlana animacja zatrzymała się). Fizjoterapeuta może także utrudniać lub ułatwiać trening, regulując poziom dla danego wskaźnika, po osiągnięciu którego uczestnik otrzymuje „nagrodę” (np. uruchamia się animacja czy gra). W razie potrzeby ma też możliwość ingerowania w kwestie techniczne związane ze stosowanymi czujnikami i np. przerwać trening, aby przytoczyć odklejoną na skutek pocenia się skóry elektrodę.

## **1.7. Uczenie się, informacja zwrotna i warunkowanie instrumentalne**

Osoby poddane biofeedbackowi są w stanie nauczyć się ingerowania w procesy, które zwykle przebiegają bez uświadamiania ich sobie. Nie powinno zatem dziwić, że podstawą działania biofeedbacku jest proces uczenia się (Dunn i wsp., 1986), który nierozzerwalnie wiąże się także z pamięcią.

Biologiczne sprzężenie zwrotne bazuje na procesach uczenia się i zapamiętywania, które z kolei zachodzą dzięki pobudliwości i plastyczności układu nerwowego (Kandel i wsp., 2000). Pobudliwość i plastyczność należą do podstawowych właściwości układu nerwowego człowieka. W dużym uogólnieniu oznaczają wspólnie, że układ nerwowy, odpowiadając na bodźce, ulega reorganizacji (wywołując wspomniane procesy uczenia się i zapamiętywania). Z punktu widzenia neurofizjologii pobudliwość i plastyczność układu nerwowego stanowią podłoże biofeedbacku. Plastyczność układu nerwowego człowieka jest tematem bardzo obszernym, dlatego

na potrzeby biofeedbacku wspomnę jedynie o jej klasyfikacji na aktywną i bierną (Weiller i wsp., 1999). Bierna jest procesem samoistnym, niewymagającym świadomego zaangażowania osoby, której dotyczy. Przykładem biernej plastyczności jest plastyczność zwana kompensacyjną, którą indukują procesy chorobotwórcze lub urazy. Bierna obserwacja zjawisk czy wydarzeń tworzy bazę innej plastyczności o tym charakterze. Plastyczność wymagająca odpowiedniego poziomu zaangażowania osoby, której dotyczy, nosi nazwę plastyczności aktywnej i to ona jest kluczowa w treningu biofeedback. Jeśli chodzi o proporcje obu typów plastyczności, należy zaznaczyć, że podczas pierwszych treningów dominują procesy świadome, natomiast gdy dana umiejętność jest już w pewnym stopniu opanowana, główną rolę w jej dostosowaniu odgrywa nieświadome uczenie się, opierające się na pewnej „intuicji”. Wyniki badań z obszaru neuronauki wskazują, że wspomniane odpowiednie zaangażowanie w proces uczenia się związane jest z korzystnymi efektami skupienia uwagi i wysokiego poziomu motywacji na ten proces (Galván, 2010). W odniesieniu do obowiązujących teorii uczenia się, można wskazać, że biofeedback zakłada równoległe występowanie świadomych i nieświadomych procesów uczenia się, z zasadniczą dominacją tych świadomych.

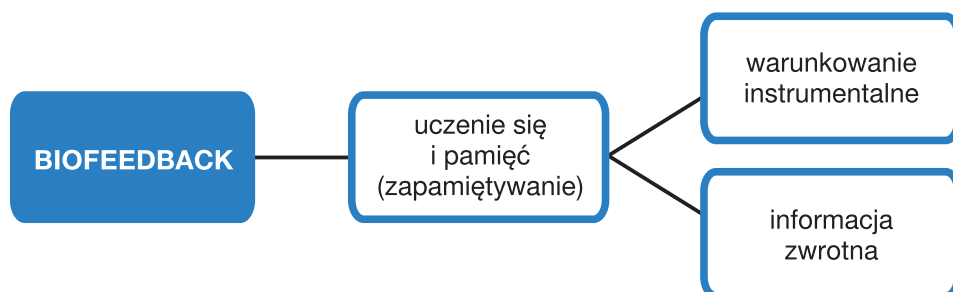
Melnikov (2021) zwrócił uwagę, że w przypadku plastyczności aktywnej osoba poddana treningowi intencjonalnie poszukuje nagrody, co prowadzi do dominacji procesów działających z góry na dół (ang. *top-down*), które przebiegają właśnie na podstawie koncentracji uwagi i zawartości krótkotrwałej pamięci roboczej. Pojawia się tu zatem kwestia nagrody, kolejnego elementu wykorzystywanego w treningu biofeedback. Psychologowie i pedagodzy zajmujący się biofeedbackiem zwracają uwagę na ukierunkowujące proces uczenia się warunkowanie instrumentalne, które jest wykorzystywane w trakcie treningu. Warunkowanie instrumentalne w treningu biofeedback polega na wzmacnianiu oczekiwanych, pożądanых reakcji poprzez odpowiednią kontrolę mierzonych parametrów czy wskaźników. Innymi słowy, uczenie się kontrolowania danego sygnału biologicznego odbywa się poprzez wielokrotne próby i korekty zachowania w celu uzyskania częstszych wzmocnień w postaci pozytywnych wyników zwrotnych. Te pozytywne informacje zwrotne stanowią rodzaj „nagród”, które w treningu biofeedback przyjmują postać alarmów dźwiękowych lub wzrokowych wysyłanych po każdym sukcesie. W tym ujęciu biofeedback opiera się na dwóch głównych umiejętnościach poznawczych, tj. zdolności rozpoznawania nagradzanego stanu oraz zdolności dostosowywania aktualnego stanu do pożądanego kierunku (Melnikov, 2021).

Ostatni aspekt biofeedbacku stanowi informacja zwrotna (czyli *feedback*). W tym miejscu należy dodać, że wyróżnia się feedback wewnętrzny i zewnętrzny. Ten wewnętrzny jest procesem fizjologicznym, polegającym na przewodzeniu do ośrod-

kowego układu nerwowego impulsacji z różnych receptorów ciała. Feedback zewnętrzny dostarcza informacji, które uzupełniają feedback wewnętrzny. Mogą być one przesyłane przez fizjoterapeutę czy trenera podczas wykonywania określonego zadania, np. ruchowego, a także przyjmować formę feedbacku końcowego, który polega na zapoznaniu się z wynikiem (ang. *knowledge of result*) po zakończeniu danej czynności. Feedback końcowy może przyjmować formę krótką, typu: „dobrze wykonane”, „zdobyłeś 18 na 20 punktów”, lub dłuższą, np.: „następnym razem zwróć uwagę na...”, „popraw...”.

W treningu biofeedback wykorzystywane są dwa rodzaje zewnętrznej informacji zwrotnej: ciągła i końcowa. Informacja ciągła, zapewniona przez urządzenia elektroniczne, umożliwia przedstawianie danych na temat stanu organizmu (parametru/ wskaźnika) osobie trenującej i stanowi podłoże treningu. Dodatkowo, po zakończeniu treningu, lub jego etapu, przedstawiana jest (zazwyczaj) informacja końcowa. Odbywa się to w sposób automatyczny, np. na ekranie wyświetlany jest wynik podsumowujący, albo po zakończeniu treningu bazującego na sygnale elektromiograficznym przedstawiona jest w graficzny sposób proporcja zadań zrealizowanych prawidłowo do tych, które były wykonane niepoprawnie.

Podsumowując, należy wskazać, że podstawę biofeedbacku stanowi proces uczenia się i zapamiętywania bazujący na plastyczności układu nerwowego (i to głównie plastyczności aktywnej, wymaga bowiem zaangażowania osoby, której dotyczy). Proces uczenia się jest wspomagany i ukierunkowywany feedbackiem uzyskiwanym dzięki wykorzystaniu urządzeń elektronicznych i dostarczaną głównie za pomocą informacji wzrokowej lub wzrokowej i słuchowej. W treningu wykorzystywane jest także warunkowanie instrumentalne, które również wspomaga proces uczenia się. Polega ono na wzmacnianiu oczekiwanych, pożądanych, reakcji poprzez odpowiednią kontrolę mierzonych parametrów lub wskaźników.



Rycina 1. Mechanizmy wykorzystywane w treningu biofeedback

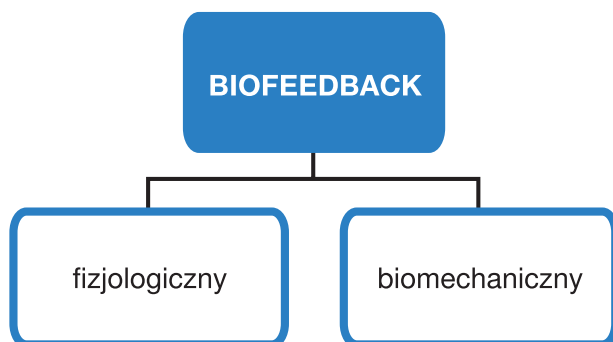
# 2

## KLASYFIKACJA BIOFEEDBACKU ZE WZGLĘDU NA MIERZONE PARAMETRY

W najnowszych opracowaniach dotyczących biologicznego sprzężenia zwrotnego podaje się jego podział ze względu na czynności, które podlegają kontroli, lub inaczej – ze względu na mierzone parametry. Podział ten zakłada występowanie dwóch podgrup, tj. biofeedbacku fizjologicznego oraz biofeedbacku biomechanicznego (Malik i Dua, 2022; ryc. 2). Układy fizjologiczne człowieka, do których biofeedback (fizjologiczny) daje najczęściej wgląd, to układ nerwowy, układ narządów ruchu, układ oddechowy i układ krążenia. Biofeedback biomechaniczny obejmuje głównie pomiary ruchu i sił oraz wskaźniki kontroli postawy ciała (Giggins i wsp., 2013).

Niezależnie od rodzaju biofeedbacku każdy trening biofeedback wymaga zastosowania odpowiednich urządzeń i czujników, przekształcenia pomiarów w informację zwrotną oraz podawania wyników osobie uczestniczącej w treningu i fizjoterapeucie (zarówno w czasie rzeczywistym, jak i po zakończeniu treningu, tak jak to wyjaśniono w rozdziale 1).

Biofeedback fizjologiczny dotyczy pomiarów określonych parametrów fizjologicznych organizmu i funkcji autonomicznego układu nerwowego dokonywanych głównie z wykorzystaniem elektrod (Giggins i wsp., 2013). Obejmuje zatem pomiary np. czynności bioelektrycznej mięśni za pomocą elektromiografii (EMG), czynności bioelektrycznej kory mózgu za pomocą elektroencefalografii (EEG), częstości skurczów serca (ang. *heart rate*, HR) czy oporności skóry zwanej również odpowiedzią galwaniczną skóry (ang. *galvanic skin response*, GSR). W zależności od pomiarów, czyli stosowanych modalności, biofeedback fizjologiczny przyjmuje następujące nazwy:



Rycina 2. Klasyfikacja biofeedbacku

EMG-biofeedback, EEG-biofeedback, HR-biofeedback i GSR-biofeedback lub analogiczne, ale bez przedrostka „bio-” (np. EMG-feedback).

Biofeedback biomechaniczny dotyczy rejestracji przebiegu ruchu, a także jest związany z orientacją przestrzenną (Giggins i wsp., 2013). Do wykorzystywanych w pomiarach czujników należą akcelerometry, żyroskopy, sensory inercyjne, czujniki siły, ultrasonografia w czasie rzeczywistym (ang. *real-time ultrasound, rtUSG*) i inne. Autorzy najnowszych artykułów naukowych związanych z biofeedbackiem do tego biomechanicznego zaliczają także wirtualną rzeczywistość (ang. *virtual reality, VR*; Recker i wsp., 2023).

# 3

## BIOLOGICZNE SPRZĘŻENIE ZWROTNE JAKO INGIERENCJA W CZYNNOŚĆ AUTONOMICZNEGO UKŁADU NERWOWEGO

W związku z tym, że biofeedback pozwala uczyć się kontrolowania czy wpływania na pewne aspekty czynności ludzkiego organizmu, do których najczęściej bez urządzeń elektronicznych nie mamy wglądu, warto w tym miejscu omówić jedną ważną, podstawową, kwestię. Może się ona okazać się dość przewrotna i zaskakująca. Biologiczne sprzężenie zwrotne stosuje się m.in. do ingerowania w czynność autonomicznego układu nerwowego (AUN). Termin „autonomiczny” sugeruje, że ta część układu nerwowego jest funkcjonalnie niezależna od jakiegokolwiek dobrowolnej kontroli nerwowej lub poznawczej, co nie jest prawdą. Przykładem biofeedbacku wykorzystywanego w nauce kontroli czynności AUN jest np. HRV-biofeedback (ang. *heart rate variability*, zmienność częstości skurczów serca) czy GSR-biofeedback.

Pokrótkę więc przypomnę (za: Sequeira i wsp., 2009), że filogenetycznie AUN jest główną i najstarszą częścią układu nerwowego. Kontroluje on m.in. czynność układu sercowo-naczyniowego, mięśnie gładkie, gruczoły, układy sensoryczne, takie jak narząd wzroku czy skóra. Regulując środowisko wewnętrzne organizmu, przyczynia się do utrzymania w nim homeostazy. Według Sequeiry i wsp. (2000) czynność AUN ułatwia adaptacyjne odpowiedzi układu endokrynologicznego, immunologicznego, sensoryczno-motorycznego i poznawczego. Funkcje AUN są regulowane za pomocą jego dwóch części: przywspółczulnej i współczulnej. Cechy anatomiczne i neurochemiczne części przywspółczulnej umożliwiają różne adaptacje funkcjonalne, często przeciwstawne do adaptacji wynikających z czynności układu współczulnego. Część przywspółczulna pozostaje pod kontrolą neuronów autonomicznych zlokalizowanych w jądrach pnia mózgu i rdzenia kręgowego, podczas gdy część współczulna znajduje się pod wyłączną kontrolą neuronów rdzeniowo-piersiowych (Sequeira i wsp., 2009). Czynność obu części regulowana jest przez neurony pnia mózgu, podwzgórza, układu limbicznego, a nawet obszary korowe (Sequeira i wsp., 2000). Część współczulna odpowiada na sytuacje zagrożenia (reakcje „walcz lub uciekaj”) i ułatwia wydatkowanie energii, a część przywspółczulna jest bardziej aktywna podczas odpoczynku i snu oraz sprzyja odbudowie i zachowaniu energii. Zgodnie z tradycyjną doktryną równowagi autonomicznej większość celów autonomicznych (docelowych struktur) jest objęta podwójną, przeciwstawną, kontrolą wywieraną odpowiednio przez obie części AUN. Obecnie zwraca się uwagę na to, że wspomniany model nie wyjaśnia całego zakresu kontroli autonomicznej. Jako



alternatywę Berntson i wsp. (1991) zaproponowali wielowymiarowy model regulacji autonomicznej oparty na pojęciu przestrzeni autonomicznej. Według autorów wielorakie tryby kontroli autonomicznej nie leżą wzdłuż pojedynczego kontinuum rozciągającego się od dominacji przywspółczulnej do współczulnej, ale raczej są rozmieszczone w dwuwymiarowej przestrzeni. Model ten, zweryfikowany empirycznie, obejmuje rozpoznane złożoności kontroli autonomicznej i dlatego pozwala lepiej zrozumieć subtelne zmiany autonomiczne. Zalicza się do nich zwłaszcza te zachodzące pod wpływem wyższych struktur ośrodkowego układu nerwowego, np. indukowane treningiem biofeedback.

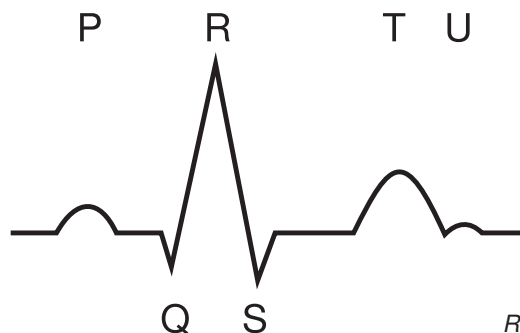
# 4

## HRV-BIOFEEDBACK JAKO JEDNĄ Z PODSTAWOWYCH MODALNOŚCI BIOFEEDBACKU FIZJOLOGICZNEGO

Parametr HR (ang. *heart rate*) oznacza częstość skurczów serca podczas jednej minuty, natomiast HRV (ang. *heart rate variability*) to zmienność rytmu pracy serca. Owa zmienność jest związana z wahaniami czasowymi między uderzeniami serca, co odzwierciedlają zmiany długości odstępu RR elektrokardiogramu (EKG) (Porges, 2022). EKG jest podstawową metodą badawczo-diagnostyczną służącą do obliczania wskaźnika HRV, a także klasyczną metodą obliczania HR. Zapis EKG charakteryzują załamki (P, Q, R, S i T, czasem także wyróżnia się załamek U), odcinki i odstępy (Tomasik i wsp., 1998) (ryc. 3).

Wspomniany odstęp RR to odległość między występującymi kolejno po sobie załawkami R. Załamek R wchodzi w skład zespołu QRS i stanowi pierwsze dodatnie jego wychylenie. Za pomocą długości odstępu RR oblicza się wspomnianą częstość/częstotliwość akcji serca, zgodnie ze wzorem  $HR = v/RR \times 60 \text{ s}$ , gdzie  $v$  oznacza prędkość przesuwu taśmy (do rejestracji EKG) i wynosi zwykle 25 lub 50 mm/s. RR (czyli długość odstępu RR) jest wyrażona w milimetrach (Tomasik i wsp., 1998). Poziom (wartość) HRV jest określany zarówno w dziedzinie czasu, jak i częstotliwości zapisu EKG lub coraz częściej uzyskuje się go z zapisu fali tętna mierzonego na płątku ucha, klatce piersiowej czy palcu wskazującym za pomocą fotopletyzmoigrafii (Malcangi i Nano, 2021).

HRV-biofeedback jest jedną z podstawowych modalności feedbacku fizjologicznego i dotyczy regulacji czynności układu autonomicznego. Tym samym, skoro HRV-biofeedback odnosi się do regulacji AUN, nie jest niespodzianką, że poziom HRV jest regulowany poprzez różne mechanizmy związane z czynnością tego układu.



Rycina 3. Krzywa EKG z załawkami

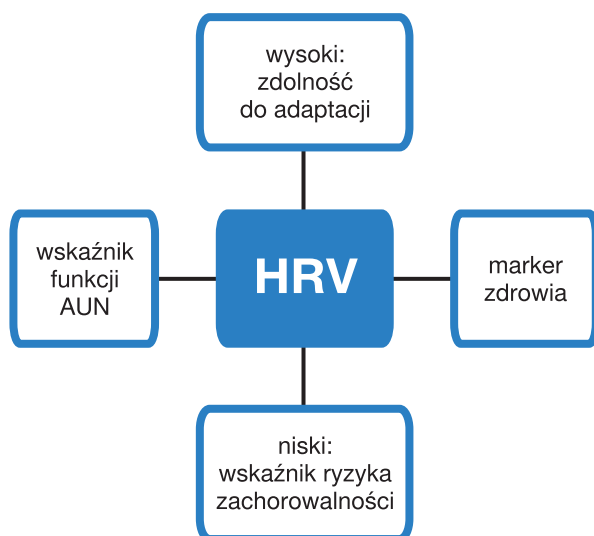
## 4.1. Fizjologiczne mechanizmy kontrolujące poziom HRV

Lehrer i wsp. (2020) oraz Gitler i wsp. (2022) wykazali, że HRV jest modulowany przez wiele mechanizmów regulacyjnych, które działają w różnych skalach czasowych. Zdaniem autorów są to tzw. mechanizmy regulacji krótko- i długoterminowej. Do mechanizmów krótkoterminowych należą te autonomiczne, wśród których wyróżnia się mechanizmy sercowo-naczyniowe i oddechowe. Krótkoterminowa autonomiczna regulacja jest zapewniona przez współczulny układ nerwowy i nerw błędny przywspółczulnego układu nerwowego. Obie te współzależne składowe AUN modulują częstość akcji serca poprzez jej zwiększanie lub zmniejszanie zgodnie z dwiema prawidłowościami fizjologicznymi. Pierwsza jest związana z regulacją ciśnienia krwi i zapewniana przez baroreceptory (krótkoterminowy mechanizm sercowo-naczyniowy). Polega na tym, że zwiększa HR, gdy ciśnienie krwi spada, i odwrotnie – zmniejsza HR, gdy ciśnienie krwi się zwiększa. Druga prawidłowość nosi nazwę oddechowej arytmii zatokowej (ang. *respiratory sinus arrhythmia*, RSA; krótkoterminowy mechanizm oddechowy) i sprawia, że HR wzrasta podczas wdechu i zmniejsza się podczas wydechu. Do mechanizmów długoterminowych zalicza się interakcje pomiędzy rytmami okołodobowymi, temperaturą ciała, metabolizmem oraz oddziaływanie nerwu błędnego na czynność mięśnia sercowego. Wskazuje się też czynniki fizjologiczne (np. hormony, stany zapalne), czynniki neuropsychologiczne (np. emocje, stres, regulacja poznawcza), a także czynniki środowiskowe związane ze stylem życia (sposób odżywiania się, podejmowanie aktywności fizycznej, zachowania zdrowotne, spożywanie alkoholu i inne) (Fournié i wsp., 2021).

Warto dodać, że w zależności od czasu trwania rejestracji EKG można wskazać poziom HRV dla krótkiego (np. 5-minutowego) lub dla długiego (np. dobowego) zapisu i tym samym uzyskać wgląd w oba rodzaje (wybrany rodzaj) mechanizmu regulującego. W kontekście treningów biofeedback najczęściej dokonuje się pomiarów związanych z mechanizmami regulacji krótkotrwałej. W tym przypadku odpowiednia analiza zarejestrowanego sygnału umożliwi wgląd w wybrany mechanizm krótkoterminowej regulacji HRV. Konkretnie, dokonuje się podziału zarejestrowanego widma mocy zapisu na pasma niskiej i wysokiej częstotliwości. Pasma niskiej częstotliwości odpowiada aktywności baroreceptorów, pętli sprzężenia zwrotnego między baroreceptorami a pniem mózgu, która reguluje ciśnienie tętnicze krwi zarówno przez odpływ współczulny, jak i przywspółczulny, powodując nieco wolniejsze zmiany HR. Pasma wysokiej częstotliwości odzwierciedla wpływ oddychania na modulację HR (RSA) (Al-Tamimi, 2022). Niektórzy autorzy wskazują, że niskie częstotliwości odzwierciedlają po prostu aktywność współczulną i odruchy z baroreceptorów, a wysokie – aktywność przywspółczulną.

W wielu pracach można się spotkać ze stwierdzeniem, że pewne parametry HRV są silnie skorelowane z rzeczywistą aktywnością nerwu błędnego ( $r = 0,88$ ) (Lehrer i wsp., 2020). Parametry te bywają określane jako vmHRV (ang. *vagally mediated HRV*). Warto w tym miejscu przypomnieć, że nerw błędny (łac. *nervus vagus*) jest dziesiątym nerwem czaszkowym i stanowi główną gałąź przywspółczulnej części AUN. Nerw błędny unerwia większość narządów wewnętrznych, które pełnią podstawową rolę w utrzymaniu zdrowia. Do narządów tych należy serce, płuca, wątroba czy jelito grube. Nerw błędny jest nerwem mieszanym, czyli przewodzi sygnały z mózgu do narządów trzewnych (eferentnie) i odwrotnie (aferentnie) – z narządów do mózgu. Pełni także istotną rolę neuroimmunologiczną w związku z tym, że układ nerwowy i odpornościowy oddziałują na siebie wzajemnie/dwukierunkowo. Obecnie wskazuje się, że neuroimmunologiczne funkcje nerwu błędnego mają istotne implikacje w kontroli chorób. W tym kontekście kolejną ważną funkcją nerwu błędnego jest rozszerzanie naczyń krwionośnych, które przeciwdziałają odpowiedzi współczulnej. Jest to osiągnięte w szczególności przez indukowany przez nerw błędny wzrost wazoaktywnego peptydu jelitowego, który następnie zwiększa wieńcowy przepływ krwi. Ta antyhipoksyjna rola jest kluczowa dla zmniejszenia ryzyka choroby niedokrwiennej serca, udaru mózgu, a także nowotworów, które rozwijają się w warunkach hipoksji.

Z mechanizmów regulacji zmienności czynności pracy serca wynika, dlaczego HRV mierzony w spoczynku stanowi wskaźnik funkcji AUN (Fournié i wsp., 2021). Przyjmuje się, że jest on także biomarkerem stanu zdrowia (Shaffer i wsp., 2014). Większość chorób przewlekłych ma związek z zaburzeniami czynności AUN,



Rycina 4. Uogólnione znaczenie zmienności czynności pracy serca (HRV)

tj. zwiększoną czynnością współczulnego układu autonomicznego przy zmniejszonej czynności nerwu błędnego przywspółczulnego układu nerwowego (Al-Tamimi, 2022). Tego rodzaju nieprawidłowości są postrzegane z jednej strony jako główny czynnik ryzyka choroby przewlekłej i jej rozwoju, a z drugiej jako jej konsekwencje. Stan chorobowy pociąga za sobą szereg zmian fizjologicznych, takich jak hipersekrecja hormonów stresu (kortyzolu, noradrenaliny), zaburzenia snu, uwalnianie mediatorów stanu zapalnego, nadciśnienie tętnicze, dysfunkcje układu odpornościowego, które wtórnie mogą przyczynić się do pogorszenia stanu zdrowia i rozwoju chorób współistniejących. Dodatkowo wykazano związek między etiopatogenezą chorób sercowo-naczyniowych, nowotworów i choroby Alzheimera a niską aktywnością nerwu błędnego.

W pewnym uproszczeniu można stwierdzić, że wysoki poziom HRV odzwierciedla zdolność adaptacji układu sercowego do różnego rodzaju zmian i jest pożądanym. Niski HRV stanowi natomiast wskaźnik ryzyka zachorowalności i śmiertelności z przyczyn sercowo-naczyniowych. Nie zawsze jednak wyższy HRV jest lepszy, ponieważ jego wzrost mogą powodować różnego rodzaju stany patologiczne (Shaffer i Ginsberg, 2017). W celu zaznajomienia się z różnymi wskaźnikami HRV i odpowiadającymi im wartościami normatywnymi polecam zapoznanie się z pracą Shaffera i Ginsberga (2017) w całości.

## 4.2. Rekomendowane protokoły i efekty treningów

Treningi HRV-biofeedback prowadzą do zwiększenia HRV i przywrócenia kontroli nerwu błędnego nad czynnością mięśnia sercowego oraz do poprawy samoregulacji emocjonalnej. Trening HRV wymaga zazwyczaj dostosowania oddechu do częstotliwości rezonansowej, która wynosi około 0,1 Hz z pewnymi różnicami indywidualnymi, aby osiągnąć maksymalny RSA i HRV przeciwdziałające hiperwentylacji i zwiększające aktywność części przywspółczulnej. Al-Tamimi (2022) oraz Fournié i wsp. (2021) podkreślają, że kiedy częstość oddechów zbliża się do 6 na minutę, dochodzi do korzystnej synchronizacji odruchu z baroreceptorów i czynności oddechowej i tworzy się specyficzny wzorec sygnału HRV. Jest to zgodne z psychofizjologicznym modelem zaproponowanym przez McCraty'ego i wsp., którzy wskazali, że przy częstotliwości rezonansowej odpowiadającej ok. 6 oddechom/min dochodzi do pojawienia się specyficznego wzorca rytmu serca – na skutek synchronizacji HR z innymi systemami oscylacyjnymi, takimi jak RSA i odruch z baroreceptorów. Synchronizacja systemów oscylacyjnych jest wykazywana przez sinusoidalne oscylacje oddechu, HR, a także ciśnienie tętnicze krwi odzwierciedlające „stan koherencji”. Trening HRV-biofeedback często bazuje na mniej więcej 6 od-

dechach/min, chociaż ustalono, że uwzględnienie indywidualnej częstotliwości rezonansowej HR ułatwia osiągnięcie stanu powyższej koherencji.

Protokoły HRV-biofeedbacku zawierają najczęściej od 4 do 12 nadzorowanych sesji treningowych (z fizjoterapeutą), którym towarzyszą regularne treningi wykonywane w warunkach domowych. Podczas sesji nadzorowanych przez fizjoterapeutę realizowane są ćwiczenia HRV-biofeedback. natomiast Praktyka domowa opiera się na ćwiczeniach i utrwalaniu umiejętności oddychania torem przeponowym oraz stymulowaniu reaktywności HRV. Fournié i wsp. (2021) rekomendują co najmniej jedną sesję nadzorowaną HRV-biofeedbacku, a po niej regularną praktykę w domu przez co najmniej 10 minut dziennie przez 4 tygodnie. We wcześniejszych zaleceniach mówiło się o 5 sesjach nadzorowanych i 20-minutowych codziennych ćwiczeniach. Najlepiej jest jednak dostosować ramy treningowe do indywidualnych potrzeb osoby poddanej ćwiczeniom, uwzględnić jej preferencje i możliwości, z zachowaniem opcji zwiększenia liczby sesji nadzorowanych i zastosowania dłuższych protokołów, gdy będzie to konieczne.

W odniesieniu do przebiegu pojedynczego treningu HRV-biofeedback określono szereg zaleceń. Dotyczą one m.in. okresu zapoznawczego pozwalającego nauczyć się powolnego oddychania podczas pierwszych treningów w celu uniknięcia niepożądanych efektów (niepokoj, hiperwentylacji czy odczucia zadyszki). Zalecane jest także wprowadzenie oddychania brzuszno (przy zamkniętych wargach) z nieznacznie wydłużonym wydechem i stopniowe zmniejszanie czasu ekspozycji na wzrokową informację zwrotną w trakcie treningu. Protokół opisany przez Lehrera i wsp. (2013) zawiera krótką instrukcję przeciwdziałania hiperwentylacji („unikaj nadmiernie głębokiego oddychania, oddychaj płytko i naturalnie”).

Pozytywne efekty HRV-biofeedbacku stwierdzono w badaniach nad jego wykorzystaniem przeprowadzonych wśród osób z nadciśnieniem tętniczym krwi (istotna statystycznie redukcja ciśnienia tętniczego) i chorobami sercowo-naczyniowymi (poprawa dotycząca rocznych prognoz zdarzeń naczyniowo-sercowych), a także u osób z astmą, depresją, zaburzeniami lękowymi, zaburzeniami snu, wybranymi objawami zespołu stresu pourazowego i w redukcji bólu (Fournié i wsp., 2021). Zdaniem Gitlera i wsp. (2022) poziom dowodów naukowych na korzystne efekty treningu HRV-biofeedback jest wysoki w przypadku choroby niedokrwiennej serca, nadciśnienia tętniczego krwi i redukcji bólu, umiarkowany w przypadku choroby nowotworowej oraz niski w przypadku cukrzycy i demencji.

Podsumowując, HRV-biofeedback znajduje szerokie zastosowanie, jest zalecany profesjonalnym sportowcom oraz osobom z chorobami przewlekłymi i w terapii stresu (Lehrer i wsp., 2020; Gitler i wsp., 2022).

# 5

## EMG-BIOFEEDBACK

Trening biofeedback, bazujący na sygnale elektromiograficznym (EMG), dotyczy czynności mięśni szkieletowych. Podczas treningu EMG-biofeedback wykorzystywany jest nieinwazyjny sposób rejestracji czynności bioelektrycznej mięśni szkieletowych z powierzchni skóry (ang. *surface EMG*, powierzchniowe EMG), dlatego czasem trening ten nosi miano sEMG-biofeedbacku. Elektromiografia powierzchniowa jest szeroko omawiana na zajęciach z innych przedmiotów realizowanych w toku studiów na kierunku fizjoterapii, stanowi bowiem fundamentalną metodę badań w naukach o ruchu człowieka. Podobnie jak elektrokardiografia (o której była mowa w rozdziale 4) i elektroencefalografia (patrz rozdz. 6.1.), należy do badawczo-diagnostycznych metod elektrofizjologicznych. Elektromiografia pozwala mierzyć potencjał czynnościowy włókien mięśniowych pobudzonych przez alfa motoneurony (neurony ruchowe typu alfa). Wielkość amplitudy sygnału EMG jest wyrażana w mikrowoltach [ $\mu\text{V}$ ], a częstotliwość w hercach [Hz]. Wielkość zarejestrowanego sygnału odpowiada wielkości pobudzenia mięśnia, które jest regulowane przez układ nerwowy za pomocą tzw. czynników nerwowych. Należą do nich: rekrutacja/derekrutacja jednostek motorycznych, częstotliwość pobudzeń zrekrutowanych jednostek motorycznych oraz wzorzec pobudzeń. Zapis nieprzetworzonego, czyli surowego sygnału, jest trudny w interpretacji, dlatego EMG-biofeedback wykorzystuje przetworzony sygnał, np. w postaci parametru nazywanego wartością skuteczną RMS [ $\mu\text{V}$ ] (Krawiecki i wsp., 2016) i przedstawia jego zmiany w czasie (tzw. rzeczywistym; w rezultacie z pewnym opóźnieniem). Jeśli chodzi o częstotliwość, to ma tu zastosowanie częstotliwość środkowa, czyli mediana [Hz], lub gęstość widmowa PSD (ang. *power spectrum density*). Na monitorze fizjoterapeuty mediana częstotliwości jest przedstawiana na osi *y*, a na osi *x* podany jest czas. Taki sposób prezentowania sygnału przyjmuje skrót MFT (ang. *median frequency time*). W przypadku PSD na osi *x* wyświetlana jest częstotliwość [Hz], a na osi *y* moc sygnału. Warto zwrócić uwagę, że PSD nie zawiera wymiaru czasowego, dlatego w oprogramowaniu należy określić przedział czasowy, który będzie na bieżąco brany pod uwagę w analizie wyników (Malik i Dua, 2022). Niezależnie od przyjętego sposobu przedstawiania sygnału EMG należy pamiętać, że ze względu na różne aspekty rejestracji (w tym sposób rejestracji z powierzchni skóry) sygnał stanowi pewną aproksymację rzeczywistej miary pobudliwości, ponieważ jest on „przefiltrowany” przez elektrodę, skórę i tkankę tłuszczową oraz podlega wpływom artefaktów (zakłóceń) (Kon-

rad, 2007). Prowadząc trening EMG-biofeedback w celu reedukacji czynności ruchowych, należy pamiętać, że funkcje ruchowe są wypadkową działania nie tyle pojedynczych mięśni, co ich grup stanowiących jednostki miotatyczne. Za jednostki miotatyczne uznaje się grupy mięśni antagonistycznych, tj. agonistów (w tym synergistów) i antagonistów działających na dany staw maziowy. Zgodnie z zaleceniami Schwartza i Andrasika (2016) cele treningowe EMG-biofeedbacku są ustalane dla maksymalnie 10 mięśni (po pięć na każdą stronę). Nagradza się kombinację rekrutacji/relaksacji, która prowadzi np. do włączenia lub wyłączenia wyświetlanego trenowanej osobie filmu. Kluczowe jest zatem to, że osoba poddana treningowi nie stara się kontrolować konkretnego mięśnia, lecz generuje odpowiedni układ czynności jednostki miotatycznej (najmniej: agonisty i antagonisty), który skutkuje otrzymaniem nagrody (Schwartz i Andrasik, 2016). Innym przykładem zastosowania treningu EMG-biofeedbacku w fizjoterapii jest trening mięśni kończyn dolnych (kończyny dolnej) po zabiegu operacyjnym w obrębie stawu kolanowego. Według danych przedstawionych w metaanalizie autorstwa Xie i wsp. (2021) tego rodzaju trening ma szczególne znaczenie w działaniach zmierzający do poprawy zredukowanego zakresu ruchu w stawie kolanowym po jego operacji. W analizie tej cechy (zwiększenia zakresu ruchu w stawie kolanowym) okazał się on skuteczniejszy od tzw. podejść konwencjonalnych. Nie był jednak skuteczniejszy od innych metod rehabilitacji w zakresie łagodzenia bólu i poprawy funkcji stawu kolanowego ocenionych za pomocą Skali Lysholma (ang. *Lysholm Knee Scale*) (Xie i wsp., 2021).

Ciekawy przykład EMG-biofeedbacku stanowi trening mięśni kończyny górnej. Często wykorzystywanym protokołem, choć trudnym w realizacji z uwagi na liczbę mięśni, jest trening zginania/prostowania ręki w nadgarstku lub np. trening chwytu siłowego ręki. Rejestracji podlegają tu odpowiednio mięśnie: zginacze i prostowniki nadgarstka lub palców. Wreszcie EMG-biofeedback od lat jest stosowany w treningu osób po udarze mózgu, zwłaszcza w odniesieniu do redukcji hipertonii mięśniowej, czyli zwiększonego napięcia mięśniowego, choć jego efektywność nie została w tym przypadku jednoznacznie określona. Trening polega na nauce hamowania wzmożonej czynności mięśni i często dotyczy hiperaktywnego odruchu na rozciąganie mięśnia dwugłowego ramienia (Wolf i Segal, 1990). W tym miejscu warto wspomnieć, że EMG-biofeedback jest łączony także z terapią polegającą na iniekcjach mięśni spastycznych toksyną botulinową. Ćwiczenia polegają na zwiększaniu siły mięśni prostowników, podczas gdy czynność mięśni zginaczy jest chemicznie zredukowana za pomocą wspomnianej toksyny botulinowej (Wu X. i wsp., 2021; Wu Z.X. i wsp., 2021).



## 5.1. Rekomendowane protokoły i efekty treningów

Podstawą treningu EMG-biofeedback jest dostarczenie osobie w nim uczestniczącej informacji o napięciu mięśniowym w określonym obszarze, aby ułatwić naukę kontrolowania czynności danej grupy mięśni. Trening, którego celem jest obniżenie napięcia mięśniowego, zwykle przebiega w określony sposób. Po przejściu instruktażu osoba poddana treningowi wykonuje spokojne ćwiczenia, podczas których próbuje obniżyć mierzone napięcie mięśniowe, wykorzystując sygnał biofeedback jako zewnętrzną wskazówkę. Zadaniem fizjoterapeuty jest ułatwianie procesu uczenia się regulowania napięcia mięśniowego. Może on np. sugerować różne sposoby relaksacji, pomóc w radzeniu sobie z przeszkodami w nauce, śledzić postępy. Podobnie jak w przypadku innych typów biofeedbacku, zaleca się prowadzenie ćwiczeń w domu, co sprzyja osiągnięciu ostatecznego celu treningowego, czyli (w tym przypadku) nabycia umiejętności kontrolowania napięcia mięśniowego bez pomocy urządzeń elektronicznych. Przebieg procesu uczenia się regulowania czynności mięśni szkieletowych w treningu EMG-biofeedback jest oczywiście kwestią indywidualną i zazwyczaj trwa od jednego do trzech miesięcy.

Feng i wsp. (2023) na podstawie wyników metaanalizy sieciowej z podejściem Bayesa, do której włączono wyniki 45 randomizowanych badań (z grupą kontrolną), stwierdzili, że EMG-biofeedback w połączeniu z treningiem rehabilitacyjnym (BFT + RT) jest najskuteczniejszą opcją fizjoterapii mającej na celu poprawę funkcji motorycznych kończyn górnych i łagodzenie bólu u osób z zespołem odruchowej dystrofii współczulnej (zespół bark-ręka) po udarze mózgu. Po szczegóły odsyłam do przytoczonego artykułu.

# 6

## NEUROFEEDBACK, CZYLI PODGRUPA TRENINGÓW BIOFEEDBACKU WPŁYWAJĄCYCH NA CZYNNOŚĆ MÓZGU

Neurofeedback to rodzaj biofeedbacku ukierunkowanego na czynność mózgu, stanowi zatem podgrupę treningów biofeedbacku, które służą uzyskaniu pewnego poziomu kontroli nad (niektórymi) procesami zachodzącymi w ludzkim mózgu. W neurofeedbacku wykorzystywane są różne czujniki i tym samym rejestrowane różne parametry. Najczęściej stosowanym sygnałem jest sygnał elektroencefalograficzny (EEG-biofeedback), rzadziej pomiar przepływu krwi w mózgu z użyciem podczerwieni (hemoencefalograficzny; HEG-biofeedback), funkcjonalne obrazowanie czynności mózgu metodą rezonansu magnetycznego w czasie rzeczywistym (rtfMRI-biofeedback) czy funkcjonalna spektroskopia w bliskiej podczerwieni (fNIRS-biofeedback). Niektórzy autorzy wskazują także na tomografię elektromagnetyczną niskiej rozdzielczości (LORETA), wolne potencjały korowe (SCP) czy niskoenergetyczny system neurofeedback (LENS). Uważa się, że neurofeedback indukuje długotrwałe wzmocnienie (ang. *long term potentiation*, LTP) synaps, czyli długotrwały wzrost ich aktywności. Nie jest to zaskakujące. Skoro uczenie się stanowi bazę biofeedbacku w ogóle, to warto wspomnieć, że LTP stojące u podstaw plastyczności synaptycznej, powszechnie uchodzi za jeden z głównych mechanizmów komórkowych leżących u podstaw uczenia się i pamięci. Na poziomie makroskopowym mechanizm ten pozwala na „przeprogramowanie” istniejących, lub nawet tworzenie nowych, obwodów neuronalnych. Neurofeedback przywraca równowagę pomiędzy procesami stymulacyjnymi a hamującymi, regulując proporcję między nimi.

Neurofeedback łączy w sobie elementy neurofizjologii i psychoterapii. Zaliczany jest także do neurorehabilitacji. Może być stosowany przez fizjoterapeutów, ale ze względu na jego (dotychczasowe) główne ukierunkowanie na procesy umysłowe (a nie np. wyłącznie motoryczne) często bywa wykorzystywany przez psychologów, pedagogów (w tym pedagogów specjalnych) czy nauczycieli.

### 6.1. EEG-biofeedback jako najczęściej stosowany rodzaj neurofeedbacku

Biofeedback, w którym wykorzystuje się sygnał EEG (EEG-biofeedback), jest historycznie pierwszym i obecnie najczęściej stosowanym rodzajem neurofeedbacku. Z tego powodu, chociaż neurofeedback jest pojęciem szerszym od EEG-

-biofeedbacku, terminy te błędnie bywają stosowane zamiennie. Ta pomyłka wynika także z tego, że – uważany za ojca neurofeedbacku – prof. Joe Kamiyae, jako pierwszy poczynił obserwacje i publikacje (w 1962 r.) na temat uczenia się, jak modyfikować wzorce czynności bioelektrycznej mózgu (na bazie sygnału EEG), przyczyniając się do powstania nowego obszaru badań i poszukiwania zastosowań klinicznych EEG-biofeedbacku. Inspirujące historie dotyczące badań i życia profesora są szeroko dostępne w Internecie. Polecam tekst *In Memoriam* zamieszczony na stronie Towarzystwa Badań nad Snem (<https://sleepresearchsociety.org/>).

Celem neurofeedbacku jest nauczenie się modyfikowania sygnału EEG za pomocą strategii mentalnych (obejmujących procesy umysłowe, np. skupienie uwagi) i/lub fizycznych (związanych z ciałem, np. jego celowe rozluźnianie). W tym celu wykorzystywany jest sygnał EEG przetworzony na prostą informację zwrotną. W zależności od potrzeb można za pomocą EEG-biofeedbacku nauczyć utrzymywania odpowiedniego poziomu relaksu i wysokiej uważności jednocześnie czy też zwiększenia poziomu skupienia uwagi.

Aby zrozumieć różne protokoły treningowe stosowane w EEG-biofeedbacku, należy nieco lepiej poznać zagadnienie sygnału EEG. Czynność bioelektryczna kory mózgu jest rejestrowana z powierzchni głowy za pomocą umieszczonych na niej elektrod. Zarejestrowana czynność przyjmuje postać fal, które można opisać przy użyciu amplitud i częstotliwości. Częstotliwość sygnalizuje, jak szybko fale oscylują, czyli określa, liczbę fal występujących w sygnale w ciągu sekundy [Hz]. Amplituda natomiast reprezentuje moc fal wyrażoną w mikrowoltach [ $\mu\text{V}$ ] (Marzbani i wsp., 2016). Z praktycznego punktu widzenia w EEG-biofeedbacku szczególną rolę odgrywa częstotliwość fal mózgowych.

Przyjmuje się, że zachowanie człowieka stanowi wypadkową zarejestrowanej czynności bioelektrycznej. Zanim więc przejdę do omówienia poszczególnych składowych częstotliwości czynności bioelektrycznej kory mózgu, które mają fundamentalne znaczenie dla zrozumienia mechanizmów oddziaływania EEG-biofeedbacku, pochylę się nad pojęciem zachowania. W naukach biologicznych ma ono bardzo szerokie znaczenie i jest związane z wegetatywnymi i animalnymi funkcjami organizmów (Sadowski, 2012). Te wegetatywne pełnią ważną rolę w utrzymaniu homeostazy. Do funkcji animalnych zalicza się z kolei głównie reakcje ruchowe wykonywane dobrowolnie (czyli dowolnie) z udziałem mięśni szkieletowych. To czynności animalne są podstawą zachowania, które jest rozumiane jako „skoordynowane, stosunkowo krótkotrwałe, bezpośrednio dostrzegalne przejawy funkcjonowania, najczęściej ruchowe, ale i inne. [...] Zachowanie służy zaspokajaniu potrzeb biologicznych, ochronie przed niebezpieczeństwami, ale także umożliwia poznawanie

otoczenia, umożliwiała rozród, opiekę nad potomstwem i organizowanie grup społecznych” (Sadowski, 2012, s. 21).

Zachowanie się człowieka jest więc związane z czynnością bioelektryczną kory mózgu, która to czynność podlega modyfikacjom poprzez trening EEG-biofeedback. Ma to znaczenie w kontekście treningu osób zdrowych, które pragną poprawić swoje funkcjonowanie czy zwiększyć „wydajność” zawodową, ale także w odniesieniu do pacjentów, bowiem wielu zaburzeniom (np. neurologicznym) towarzyszą nieprawidłowe wzorce aktywności korowej (Hammond, 2006). Zatem, aby zrozumieć poszczególne protokoły treningowe, mające szerokie zastosowanie w odniesieniu do osób uczestniczących w treningu, warto poszerzyć swoją wiedzę na temat częstotliwości rejestrowanych sygnałów EEG. Ważna jest tu znajomość zakresów częstotliwości sygnałów, ich nazw, a także charakterystyki poszczególnych fal, ponieważ to „częstotliwościowy” EEG-biofeedback jest najczęściej używany i opisywany

Tabela 1. Charakterystyka poszczególnych pasm częstotliwości sygnału elektroencefalograficznego

ZAKRES CZĘSTOTLIWOŚCI [HZ]	NAZWA FALI	CECHY PRZYPISYWANE FALI	ZNACZENIE
1–4	delta	śpiący, senny	Powinna być niska w trakcie czuwania. Zapewnia „regenerację” w czasie snu.
4–8	theta	wizualizacja, rozmyślanie, kreatywność, rozkojarzenie	Wzrasta w czasie wizualizacji, medytacji, zasypiania. Jej nadmiar (w czuwaniu) może oznaczać problemy z koncentracją, depresję, zaburzenia lękowe.
8–13	alfa	uwaga i poczucie odprężenia/spokoju, relaksacja	Dominujące pasmo przy oczach otwartych.
13–15	SMR (ang. <i>sensorimotor rhythm</i> )	uwaga umysłowa, (fizyczne) zrelaksowanie ciała	Oznacza wyciszenie układu nerwowego, zwiększa spokój i reguluje impulsywność.
15–30	15–20 „niska” beta	myślenie, koncentracja, uwaga, czujność i ekscytacja	Pasmo sprzyjające procesom poznawczym i rozwiązywaniu zadań.
	20–32 „wysoka” beta	napięcie nerwowe, nadpobudliwość, niepokój	Artefakty mięśniowe dotyczą tego zakresu częstotliwości (i wyższych).
32–100 lub 40	gamma	uczenie się, procesy umysłowe, rozwiązywanie problemów, wykonywanie zadań ruchowych	Duże ilości tego pasma u osób zrelaksowanych, mogą wskazywać na bystrość umysłu.

Źródło: Marzbani i wsp., 2016

w literaturze przedmiotu (Marzbani i wsp., 2016). Wskazane cechy zestawiono w tabeli 1. Nadmienię, że dokładne przedziały częstotliwości dla poszczególnych fal w EEG-biofeedbacku bywają nieco inne w różnych publikacjach i urządzeniach (np. pasmo alfa może mieścić się w zakresie 8–12 Hz, a „wysoka” beta w zakresie 18–30 Hz, a nie tak jak pokazano to w tabeli 1).

Na podstawie informacji zawartych w tabeli 1 można wywnioskować, które zakresy częstotliwości rejestrowane podczas czuwania (a nie podczas snu) są ogólnie korzystne, a nadmiar których jest niewskazany. Odpowiada to stosowanym w EEG-biofeedbacku protokołom treningowym, których celem jest zwiększenie ilości fali korzystnej, najczęściej przy jednoczesnej redukcji ilości fali niekorzystnej.

## 6.2. Rekomendowane protokoły

Punktem wyjścia wyboru protokołu (poza ewentualnymi wskazaniem, z którymi dana osoba zwraca się do fizjoterapeuty) jest tzw. ilościowy zapis EEG (ang. *quantitative EEG*; QEEG) umożliwiający obiektywną identyfikację celów treningowych. Po wiele przydatnych informacji dotyczących QEEG odsyłam do opracowania pod redakcją Borkowskiego (2015).

Wśród przykładowych protokołów treningowych wymienia się m.in.:

- Theta/beta umożliwiający obliczenia indeksu uwagi. W treningu tym hamowane jest pasmo theta, a wzmacnianie pasmo „niskiej” bety. Protokół jest przeznaczony dla osób z zaburzeniami koncentracji lub wykazujących wolne tempo pracy, a także osób o niskim poziomie aktywności ośrodkowego układu nerwowego.
- Theta/SMR. Trening polega na hamowaniu pasma theta oraz wzmacnianiu pasma SMR i jest skierowany do osób nadpobudliwych oraz impulsywnych.
- Beta/SMR. Trening polega na hamowaniu „wysokiej” bety i wzmacnianiu pasma SMR. Trening znajduje zastosowanie u osób z nadmiarem fal szybkich.

Do innych protokołów ukierunkowanych na wzmacnianie poszczególnych fal według Marzbaniego i wsp. (2016) należą:

- Protokół alfa. Jest on wykorzystywany w łagodzeniu bólu, zmniejszaniu stresu i niepokoju, poprawie pamięci, poprawie sprawności umysłowej. Najczęstszym pasmem częstotliwości treningowym alfa jest zakres 7–10 Hz, który pozwala zmniejszać poziom odczuwanego stresu i redukować niepokój. Częstotliwość 10 Hz powoduje również głębokie rozluźnienie mięśni, zmniejszenie odczuwania bólu, regulację częstości oddechów i zmniejszenie częstości akcji serca.

- Protokół beta („niska” beta). Stosowany w celu poprawy koncentracji i uwagi (wzmacnianie w zakresie 12–14 Hz), poprawy zdolności czytania (wzmacnianie w zakresie 7–9 Hz) i ogólnie poprawy wyników szkolnych. Trening ten pozwala usprawnić przetwarzanie poznawcze, redukować tendencję do zamartwiania się czy nadmiernego myślenia, łagodzić zaburzenia obsesyjno-kompulsywne. Sprawdza się w leczeniu bezsenności (wzmacnianie pasma 12–15 Hz). EEG-biofeedback z protokołem beta umożliwia zmniejszenie zmęczenia i stresu (Egner i Gruzelier, 2004; Vernon, 2005), znajduje też zastosowanie w leczeniu ADHD (Heinrich i wsp., 2007).
- Protokół gamma. Trening jest wykorzystywany do poprawienia zdolności poznawczych, bystrości umysłu i aktywności mózgu. Pozwala poprawić szybkość przetwarzania informacji, pamięć krótkotrwałą, ogranicza liczbę ataków migreny (Vernon, 2005).

Trening EEG-biofeedback przynosi efekty u osób z zespołem deficytu uwagi/nadpobudliwości psychoruchowej, schizofrenią, depresją, bezsennością, trudnościami w uczeniu się, dysleksją i dyskalkulią czy wreszcie z zaburzeniami ze spektrum autyzmu. Mogą go także stosować osoby zdrowe (np. sportowcy, artyści czy chirurdzy) w celu zwiększenia wydajności, efektywności i skuteczności określonych działań. Zalecana liczba sesji treningowych różni się znacząco w zależności od cech osoby poddanej treningowi, celu oraz stosowanego protokołu.

# 7

## BIOFEEDBACK OPARTY NA DOWODACH NAUKOWYCH

Myślę, że adresatów niniejszego opracowania, żyjących w świecie względnie łatwego dostępu do informacji (i tych prawdziwych, i tych fikcyjnych, które mogą stanowić źródło infodemii), nie dziwi fakt funkcjonującego w medycynie podejścia określanego terminem medycyny opartej na dowodach naukowych (ang. *evidence-based medicine*, EBM). Z czasem wyjściowe pojęcie EBM, mające zastosowanie głównie w środowisku lekarskim, zostało dostosowane i włączone do innych zawodów medycznych. Obecnie wyróżnia się m.in.: opiekę zdrowotną opartą na dowodach naukowych (ang. *evidence-based health care*, EBHC), praktykę pielęgniarską opartą na dowodach naukowych (ang. *evidence-based nursing practice*, EBNP) czy wreszcie fizjoterapię opartą na dowodach naukowych (ang. *evidence-based physiotherapy*, EBP).

Światowa Konfederacja Fizjoterapii dla regionu europejskiego zdefiniowała EBP jako zobowiązanie do wykorzystywania najlepszych dostępnych dowodów w celu podejmowania decyzji dotyczących opieki nad pacjentami, które obejmują: integrację [doświadczeń] fizjoterapeutów, indywidualny profesjonalny osąd i dowody uzyskane w wyniku systematycznych badań („A commitment to use the best available evidence to inform decision-making about the care of individuals that involves integrating physiotherapist practitioners and individual professional judgement with evidence gained through systematic research.”). Definicja ta opiera się na opisie EBM przedstawionym przez Sacketta i wsp. w 1996 r. i zmodyfikowanym w roku 2000. Veras i wsp. (2016) zaproponowali także aktualizację definicji EBP: obszar zdobywania wiedzy, badań i praktyki, w którym decyzje kliniczne opierają się na najlepszych dostępnych dowodach naukowych, integrując praktykę zawodową i wiedzę specjalistyczną z zasadami etycznymi („An area of study, research, and practice in which clinical decisions are based on the best available evidence, integrating professional practice and expertise with ethical principles.”). Autorzy podkreślają celowe, odrębne użycie terminów „*study*” i „*research*”, które w terminologii anglojęzycznej często odnoszą się do prowadzenia badań i często w tym kontekście są używane jako synonimy. Wspomniana celowość dotyczy znaczenia tych słów, czyli zarówno zdobywania wiedzy, jak i prowadzenia badań. Veras i wsp. zwracają zatem uwagę na oba rodzaje działalności związanej z wiedzą. Według autorów rozłożenie akcentu na te dwa obszary (i stosowanie dwóch określeń: „*study*” oraz „*research*”) ma mo-

tywować fizjoterapeutów do krytycznego myślenia. Podobną opinię wyrazili Rushton i wsp. (2011) w artykule dotyczącym konieczności „podniesienia poprzeczki” jakości badań w obszarze fizjoterapii.

Zatem, zgodnie z powyższym, dzięki otwarciu się na nowe informacje i konstruktywny krytycyzm fizjoterapeuci mogą stać się agentami transformacji i uczestniczyć w tworzeniu nauki, a nie tylko podążać za nowymi paradygmatami (Veras i wsp., 2016).

Krajowa Izba Fizjoterapeutów przyczyniła się do utworzenia polskojęzycznej wersji platformy Physiotherapy Evidence Database (PEDro); kod QR przekierowuje do platformy; <https://pedro.org.au/polish/> [dostęp z 05.01.2024]). Zgodnie z zawartymi w niej informacjami PEDro „zapewnia fizjoterapeutom z całego świata łatwy dostęp do wysokiej jakości badań klinicznych, aby mogli skutecznie praktykować i nauczać”. PEDro stanowi bazę danych około 60 000 randomizowanych badań eksperymentalnych i przeglądów systematycznych opartych na wiarygodnych i aktualnych publikacjach naukowych odnoszących się do fizjoterapii.



Dostęp do konkretnych informacji, np. dzięki platformie PEDro, jest oczywiście niezwykle ważny i potrzebny. Ale aby móc świadomie i prawidłowo korzystać z tego rodzaju danych, należy mieć wiedzę z zakresu metodologii badań naukowych i statystyki. Ich dokładny opis przekracza zakres niniejszego opracowania, jednak na potrzeby podsumowania zagadnień dotyczących biofeedbacku wspomnę, że istnieją różne sposoby pozwalające stopniować poziomy dowodów naukowych (podobnie jak ma to miejsce w EBM). W tym celu stosuje się m.in. klasy zaleceń (od I do IV, gdzie I oznacza „wskazane”, a IV – „nie zaleca się”) i poziomy wiarygodności danych (A, B, C, gdzie A oznacza dane najbardziej wiarygodne). Samo gromadzenie danych także jest stopniowane i często przedstawiane graficznie w formie piramidy, której podstawę stanowią opisy przypadków (ang. *case study*) czy serie przypadków (ang. *case reports*). Wyżej znajdują się kolejno: badania przekrojowe (ang. *cross sectional studies*), badania kliniczno-kontrolne (ang. *case-controlled studies*), badania kohortowe (ang. *cohort studies*), następnie randomizowane, kontrolowane badania kliniczne i na szczycie piramidy – metaanalizy badań z randomizacją.

Jeśli chodzi o biofeedback, to w 2001 r. członkowie AAPB oraz Society for Neuronal Regulation określili kryteria klinicznej skuteczności interwencji psychofizjologicznych (w tym biofeedbacku) zgodnie z modelem EBM (Frank i wsp., 2010). Wyróżniono pięć poziomów skuteczności, w których pierwszy jest najniższy, a piąty – najwyższy (tab. 2).



Tabela 2. Poziomy skuteczności interwencji psychofizjologicznych, w tym biofeedbacku, z 2001 r. ze skróconym opisem poszczególnych kryteriów

POZIOM SKUTECZNOŚCI	ZNACZENIE POZIOMU	KRYTERIUM
1	brak empirycznego poparcia	studium przypadku, prace nierecenzowane
2	być może ( <i>possibly</i> ) skuteczny	dowód poparty co najmniej jednym badaniem o wystarczającej mocy statystycznej z dobrze zidentyfikowanymi miarami wyniku, ale któremu brakuje randomizacji przydziału do grup
3	prawdopodobnie ( <i>probably</i> ) skuteczny	wiele badań obserwacyjnych, klinicznych, wysoka skuteczność demonstrowana w badaniach replikacyjnych
4	skuteczny	dowody na skuteczność spełniają 6 kryteriów związanych z: efektami w stosunku do innych grup/zbadano efekty dla specyficznej grupy pacjentów/z analizą statystyczną uzyskanych danych/replikacją przeprowadzonych badań/ wyższość lub równoważność leczenia eksperymentalnego została wykazana w co najmniej dwóch niezależnych środowiskach badawczych
5	skuteczny i specyficzny	Dowody na skuteczność spełniają wszystkie kryteria poziomu 4, a ponadto wykazano, że leczenie eksperymentalne jest statystycznie lepsze od wiarygodnej terapii pozorowanej lub alternatywnego leczenia w co najmniej dwóch niezależnych badaniach.

Źródło: na podstawie Frank i wsp., 2010

W odniesieniu do przedstawionych w tabeli 2 poziomów skuteczności Frank i wsp. (2010) opracowali zestawienie jednostek medycznych (tab. 3), dla których stwierdzono określony poziom skuteczności treningów biofeedback (różnych modalności i stosowanych protokołów, po szczegóły odsyłam do artykułu).

Model fizjoterapii opartej na dowodach naukowych zakłada ciągłe zdobywanie przez fizjoterapeutów wiedzy i informacji dla dobra pacjentów. Dodam więc, że dane zamieszczone w tabeli 3 w pełni korespondują z przedstawionymi w tabeli 2 pozio-

Tabela 3. Skuteczność biofeedbacku w wybranych jednostkach medycznych

<b>POZIOM 1 – brak empirycznego poparcia</b>
Zaburzenia odżywiania Wzmacnianie funkcji immunologicznych Urazy rdzenia kręgowego Omdlenia
<b>POZIOM 2 – być może skuteczny</b>
Astma Autyzm Samoistne porażenie nerwu twarzowego (porażenie Bella) Porażenie mózgowe Przewlekła obturacyjna choroba płuc Choroba wieńcowa Mukowiscydoza Zaburzenia depresyjne Zaburzenia erekcji Zespół chronicznego zmęczenia Dystonia dłoni Zespół jelita drażliwego Zespół stresu pourazowego Udar mózgu Szumy uszne Nietrzymanie moczu (u dzieci)
<b>POZIOM 3 – prawdopodobnie skuteczny</b>
Nadużywanie substancji, w tym alkoholizm Zapalenie stawów Cukrzyca Nietrzymanie stolca Ból głowy (u dzieci) Bezsenna noc Urazowe uszkodzenie mózgu Nietrzymanie moczu (u mężczyzn) Zapalenie przedsionka pochwy
<b>POZIOM 4 – skuteczny</b>
Zespół nadpobudliwości psychoruchowej z deficytem uwagi (ADHD) Przewlekły ból Zaparcia (u dorosłych) Padaczka Ból głowy (u dorosłych) Nadciśnienie tętnicze krwi Choroba lokomocyjna Choroba Raynauda Zaburzenia skroniowo-żuchwowe (bruksizm)
<b>POZIOM 5 – skuteczny i specyficzny</b>
Nietrzymanie moczu (u kobiet)

Źródło: na podstawie Frank i wsp. (2010)

mami skuteczności biofeedbacku, do których w dalszym ciągu wielu autorów i szkoleniowców się odwołuje. Stanowi to przykład konieczności wdrożenia do fizjoterapii koncepcji *lifelong learning*, czyli uczenia się przez całe życie i aktualizowania swojej wiedzy, zgodnie z EBP. Potrzeba ta wynika z faktu, że niektóre informacje zawarte w zestawieniu przygotowanym na podstawie artykułu z 2010 r. uległy dezaktualizacji, a część z nich została wręcz obalona w drodze prowadzonych badań.

Jednym z nowszych artykułów przeglądowych poświęconych skuteczności biofeedbacku w odniesieniu do pacjentów (a nie osób zdrowych) jest praca Kondo i wsp. z 2019 r. Autorzy wykorzystali w niej przyjazną dla czytelnika formę przedstawiania wyników – tzw. mapę dowodów (3D) z wykresem bąbelkowym, która stanowi graficzny zapis danych empirycznych pochodzących z wielu kontrolowanych badań dotyczących korzyści (lub braku korzyści) i szkód, jakie przynosi biofeedback w różnych schorzeniach. Na jej podstawie identyfikowane są mocne i słabe strony oraz luki i nieprzebadane obszary, a także wskazywane są pola do przyszłych badań nad biofeedbackiem. Jeśli chodzi o sposób czytania mapy, to warto wiedzieć, że za pomocą graficznych „bąbli” pozwala ona podsumować trzy grupy cech (dlatego nosi nazwę 3D):

- Po pierwsze, dla każdej choroby/dysfunkcji czy jednostki medycznej objawy podzielone są na podgrupy oznaczone różnymi kolorami: związane z diagnozą (kolorem niebieskim); wtórne, specyficzne objawy, które nie są bezpośrednio związane ze schorzeniem (np. lęk u pacjentów z bólem głowy, kolorem pomarańczowym); globalne zdrowie (np. jakość życia) oraz działania niepożądane (kolorem białym). W tym przypadku kolor „bąbla” odpowiada powyższym (np. biały oznacza wyniki globalne).
- Po drugie, dla każdej z podanych wyżej podgrup odnotowuje się, czy badania kliniczne wykazały: brak efektu, dowody niejasne lub niewystarczające, dowody na potencjalnie pozytywny efekt lub dowody na pozytywny efekt. Te cechy związane są z umiejscowieniem „bąbla” w odpowiedniej kolumnie (np. w kolumnie nazwanej „dowód na brak efektu”).
- Po trzecie, na podstawie dwóch powyższych cech, a także analizy uwzględnionych badań (pod kątem m.in. wielkości badanej próby czy ogólnej jakości badania), szacowany jest poziom wiarygodności jako: niewystarczający, niski, umiarkowany i wysoki. Obrazuje to wielkość „bąbla” – największy oznacza wysoki poziom wiarygodności.

Na podstawie analizy Kondo i wsp. (2019) można stwierdzić, że istnieją spójne dowody w dużej liczbie badań, że biofeedback może zmniejszyć ból głowy i przynieść korzyści jako trening wspomagający u mężczyzn doświadczających nietrzy-

mania moczu po prostatektomii. Spójne dowody pochodzące z mniejszej liczby badań sugerują, że biofeedback może poprawić mechanizm kontrolowania wypróżniania się (w nietrzymaniu stolca) i ułatwić powrót do zdrowia po udarze mózgu. Nie ma wystarczających dowodów na to, aby wyciągnąć wnioski na temat efektów biofeedbacku w przypadku bruksizmu, bólu porodowego i zespołu Raynauda. Biofeedback nie był korzystny w przypadku nietrzymania moczu u kobiet ani w leczeniu nadciśnienia tętniczego krwi, ale wnioski w tym zakresie mogą być obarczone błędem ze względu na małą liczebność prób i ograniczenia metodologiczne analizowanych badań.

W ciągu ostatnich trzech lat opublikowano kilka artykułów przeglądowych i metaanaliz na temat zastosowania biofeedbacku w nietrzymaniu moczu (jeden z nich, autorstwa Mazur-Biały i wsp. z 2023 r., dotyczy mężczyzn), w których, ogólnie rzecz ujmując, tego typu trening jest rekomendowany.

# 8

## ZASTOSOWANIE NOWOCZESNYCH TECHNOLOGII W FIZJOTERAPII

### 8.1. Rozwój biofeedbacku

Istnieje kilka czynników, które napędzają rozwój branży biofeedbacku, zarówno od strony stosowanych urządzeń, czujników, oprogramowań, jak i szkoleń oraz bazy informacyjnej. Należą do nich:

- postęp technologiczny;
- większa świadomość społeczeństwa;
- poszukiwanie nieinwazyjnych metod leczenia;
- duża (i rosnąca) częstość występowania chorób przewlekłych;
- rosnące obawy o zdrowie psychiczne.

Postęp technologiczny prowadzi do unowocześniania stosowanych w biofeedbacku czujników, wykorzystywanych analiz i urządzeń. W przypadku czujników znanych jest coraz więcej rozwiązań bezprzewodowych. Dostępnych jest też coraz więcej przyjaznych, względnie prostych w obsłudze urządzeń do biofeedbacku. Na polskim rynku pojawiły się również animowane grafiki i atrakcyjne wizualizacje, a także plansze reaktywne do biofeedbacku zaprojektowane z pomocą sztucznej inteligencji. Postęp technologiczny łączy się z kolejnym czynnikiem sprzyjającym, w mojej ocenie, rozwojowi biofeedbacku, czyli większą świadomością społeczeństwa. Ułatwiony za sprawą Internetu dostęp do informacji sprzyja rosnącej liczbie osób świadomych tej formy treningu i jego skuteczności. Badania nad różnymi zastosowaniami i właśnie skutecznością biofeedbacku także przyczyniają się do jego rozpowszechniania. Jeśli chodzi o kolejny czynnik wpływający na rozwój biofeedbacku, a mianowicie poszukiwanie nieinwazyjnych opcji leczenia, to jest on związany według mnie nie tylko z potrzebą unikania operacji sensu stricto, ale także z zapobieganiem konieczności przyjmowania leków, co w efekcie może prowadzić do zwiększenia zainteresowania biofeedbackiem. Biofeedback znajduje zastosowanie zarówno w kontekście prewencji chorób przewlekłych i promowania korzystnych zmian zachowania (Richardson i wsp., 2022), jak i redukcji objawów wspomnianych chorób (więcej informacji na ten temat zawarłam w rozdz. 3 i 4). Wreszcie wiele mówi się o szacunkach dotyczących (pogarszających się) rokowań względem zdrowia psychicznego osób dorosłych i dzieci. Może to sprzyjać rozwojowi biofeedbacku w odniesieniu także do tego aspektu zdrowia.

Warto w tym miejscu wspomnieć także o zastosowaniu biofeedbacku w telerehabilitacji. W 2023 r. opublikowano artykuł o charakterze przeglądu systematycznego dotyczący oceny skuteczności telerehabilitacji obejmującej biofeedback w celu umożliwienia asynchronicznej superwizji nad osobami ze schorzeniami mięśniowo-szkieletowymi (Janela i wsp., 2023). Według przedstawionych w nim badań asynchroniczna telerehabilitacja z biofeedbackiem zapewnianym przez inercyjne urządzenia do śledzenia ruchu może być skuteczna w redukcji bólu i poprawie funkcji motorycznych. Większość uwzględnionych interwencji cyfrowych była wspierana przez takie czujniki ruchu, jak akcelerometry i żyroskopy. Bardzo niską wiarygodność dowodów uzyskano w przypadku interwencji telerehabilitacyjnych opartych na kamerach.

## 8.2. Wirtualna rzeczywistość

W ciągu ostatnich dziesięcioleci rzeczywistość wirtualna (ang. *virtual reality*, VR) znalazła szerokie zastosowanie w fizjoterapii, i jak wspomniano w rozdziale 2, jest zaliczana do podgrupy biofeedbacku biomechanicznego (VR-biofeedback). Zgodnie z definicją wirtualna rzeczywistość stanowi trójwymiarową przestrzeń stworzoną za pomocą technologii informatycznej, która imituje świat realny lub stanowi wizję świata fikcyjnego. VR łączy w sobie trzy elementy: interakcję, zanurzenie, czyli immersję, i wyobrażenie, które symbolicznie zapisywane są jako I<sup>3</sup> (od angielskich słów *interaction*, *immersion* i *imagination* (Lin i wsp., 2019). Innymi słowy VR to innowacyjna technologia odnosząca się do immersyjnych, interaktywnych, wielozmysłowych, skoncentrowanych na odbiorcy, trójwymiarowych środowisk generowanych komputerowo (Lüddecke i Felnhofer, 2021). W VR wykorzystywane są interfejsy człowiek–maszyna, które zapewniają interakcję z komputerowo wygenerowanym środowiskiem (Rutkowski i wsp., 2020). W związku z rosnącą liczbą urządzeń i systemów do VR coraz większą uwagę zwraca się na poziom immersji (zagłębienia się w wirtualnym świecie), jaki one zapewniają, ponieważ jest to cecha je różnicująca (Rutkowski i wsp., 2020). Systemy VR składają się zazwyczaj z następujących elementów:

- jednostki renderującej grafikę, czyli najczęściej wysokiej klasy komputera graficznego;
- jednostki wyświetlającej przestrzeń 3D, która działa jako interfejs komputer–użytkownik (przesyła informacje od komputera do użytkownika); informacje wizualne są często prezentowane za pomocą dużych wyświetlaczy projekcyjnych lub wyświetlaczy montowanych na głowie (ang. *head-mounted-displays*, HMDs) (ryc. 5);



Rycina 5. Przykładowy wyświetlacz środowiska wirtualnego montowany na głowie osoby trenowanej (na zdjęciu widoczne są także dodatkowe urządzenia dostarczające użytkownikowi informacji czuciowych)

- systemu śledzenia, który służy jako interfejs między użytkownikiem a komputerem, zapewniając interakcję użytkownika ze światem wirtualnym (dzięki czemu realizowany jest określony trening). Nowoczesne urządzenia HMD są wyposażone w zintegrowany system śledzenia ruchów głowy umożliwiający dzięki temu użytkownikowi poruszanie głową i odpowiednią zmianę perspektywy wizualnej w środowisku wirtualnym. Inne interfejsy obejmują joysticki lub rękawice sensoryczne, które zapewniają dotykowe sprzężenie zwrotne (Burdea, 2003).

VR-biofeedback pozwala przewyżczać wyzwania napotymane w tzw. konwencjonalnych programach treningowych. Należą do nich niewystarczająca motywacja do realizowania treningu, niska koncentracja uwagi czy trudność w przeniesieniu nabytych umiejętności do codziennego życia. VR jest w stanie znacząco zwiększyć poziom zaangażowania osoby poddanej ćwiczeniom (Maarsingh i wsp., 2019).

Lin i wsp. (2019) na podstawie badań nad zastosowaniem VR-biofeedbacku w grupie osób z zaburzeniami mięśniowo-szkieletowymi stwierdzili, że ten rodzaj treningu pozwala zredukować dolegliwości bólowe, zwiększyć zakres ruchu w stawach i poprawić funkcje motoryczne pacjentów. Autorzy innego przeglądu systematycznego i metaanalizy dotyczącej wykorzystania VR w różnych obszarach rehabilitacji wykazali, że dzięki VR-biofeedbackowi dochodzi do poprawy funkcji kończyn górnych i równowagi tzw. pacjentów neurologicznych (głównie po udarach

mózgu) (Rutkowski i wsp., 2020). Podkreślili także przewagę VR-biofeedbacku bazującego na grach komputerowych (tzw. *gaming VR*) w kontekście jego dużej atrakcyjności w przypadku dzieci. W VR pokłada się nadzieję w związku z efektami jego stosowania w terapii zaburzeń lękowych i depresji, zwłaszcza że Światowa Organizacja Zdrowia przewiduje, iż do 2030 r. schorzenia psychiczne staną się główną przyczyną obciążenia chorobowych na świecie (Baghaei i wsp., 2021). Duże znaczenie może mieć także wykazanie, że uczestnicy interwencji VR-biofeedback przejawiali większą motywację i zaangażowanie, jak również zgłaszali lepsze doświadczenia z udziału w treningach w stosunku do konwencjonalnych podejść.

### 8.3. Interfejsy człowiek–maszyna

W ostatnich latach wiele informacji dotyczących interfejsów mózg–komputer (ang. *brain-computer interface*, BCI) pojawiło się za sprawą firmy Neuralink Corporation założonej m.in. przez Elona Muska. Rozwiązania tego rodzaju nie są jednak zamyśłem nowym. Interfejsy mózg–komputer umożliwiają sterowanie aplikacjami komputerowymi (ang. *computer*) za pomocą aktywności umysłowej (ang. *brain*) użytkownika bez pośrednictwa dróg zstępujących mózgu, nerwów obwodowych i mięśni szkieletowych. Ogólnie działanie interfejsu polega na zamianie sygnału biologicznego związanego z czynnością mózgu (np. sygnału EEG) na sygnał cyfrowy, który jest przesyłany do urządzenia. Tworzy to alternatywną możliwość sterowania („na odległość”) różnymi urządzeniami elektronicznymi i aplikacjami komputerowymi. Dodatkowo BCIs wpisują się w szersze pojęcie, jakim są interfejsy mózg–maszyna (ang. *brain-machine interface*, BMI), które umożliwiają sterowanie nie tylko komputerem, ale również innymi urządzeniami elektronicznymi (np. ramieniem robota czy systemem związanym z obsługą tzw. inteligentnego domu). Według Cudo i wsp. (2011) tego rodzaju rozwiązania znajdują zastosowanie w kilku obszarach życia, tj. w komunikacji, rehabilitacji i protetyce, czynnościach codziennych oraz rozrywce. Wreszcie mamy też do czynienia z interfejsem człowiek–maszyna (ang. *human-machine interface*, HMI), stanowiącym pojęcie najszersze, które odnosi się do kontrolowania różnych urządzeń za pomocą pomiarów określonych parametrów pochodzących z ciała użytkownika (nie tylko tych dotyczących czynności mózgu, ale także czynności np. mięśni szkieletowych za pomocą sEMG). Obecnie interfejsy są wykorzystywane w systemach do wirtualnej rzeczywistości (VR-biofeedbacku) i zapewniają komunikację dwustronną. Przebiega ona w kierunku od człowieka do urządzenia („klasyczny” kierunek komunikacji zapewniony dzięki czujnikom rejestrującym sygnały biologiczne) oraz od urządzenia do człowieka (dzięki urządzeniom dostarczającym do organizmu bodźce/stymulacje).



## BIBLIOGRAFIA

- Al-Tamimi S.M. (2022) Biofeedback of heart rate variability in the treatment of chronic diseases: a systematic review. *Comp Med Sci*, 8(5), 295–210, <https://doi.org/10.22317/jcms.v8i5.1289>.
- Baghaei N., Chitale V., Hlasnik A., Stemmet L., Liang H.N., Porter R. (2021) Virtual reality for supporting the treatment of depression and anxiety: scoping review. *JMIR Ment Health*, 8(9), e29681, <https://doi.org/10.2196/29681>.
- Berntson G.G., Cacioppo J.T., Quigley K.S. (1991) Autonomic determinism: the modes of autonomic control, the doctrine of autonomic space, and the laws of autonomic constraint. *Psychol Rev*, 98(4), 459–487, <https://doi.org/10.1037/0033-295x.98.4.459>.
- Borkowski P., Dobrakowski P., Namysł J., Szewczyk R., Garczyk A. (2015) Biofeedback. Innowacje. Częstochowa: Akademia im. Jana Długosza.
- Burdea G.C. (2003) Virtual rehabilitation – benefits and challenges. *Methods Inf Med*, 42(5), 519–523.
- Cudo A., Zabielska E., Bałaj B. (2011). Wprowadzenie w zagadnienie interfejsów mózg-komputer. [W:] O. Gorbaniuk, B. Kostrubiec, D. Musiał, M. Wiechetek (red.), *Studia z psychologii w KUL* (t. 17, ss. 189–211). Lublin: KUL.
- Dunn T.G., Gillig S.E., Ponsor S.E., Weil N., Utz S.W. (1986) The learning process in biofeedback: is it feed-forward or feedback? *Biofeedback Self Regul*, 11(2), 143–156, <https://doi.org/10.1007/BF00999982>.
- Egner T., Gruzeller J.H. (2004) EEG biofeedback of low beta band components: frequency-specific effects on variables of attention and event-related brain potentials. *Clin Neurophysiol*, 115(1), 131–139, [https://doi.org/10.1016/s1388-2457\(03\)00353-5](https://doi.org/10.1016/s1388-2457(03)00353-5).
- Feng S., Tang M., Huang G., Wang J., He S., Liu D., Gu L. (2023) EMG biofeedback combined with rehabilitation training may be the best physical therapy for improving upper limb motor function and relieving pain in patients with the post-stroke shoulder-hand syndrome: a Bayesian network meta-analysis. *Front Neurol*, 13, 1056156, <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.1056156>.
- Fournié C., Chouchou F., Dalleau G., Caderby T., Cabrera Q., Verkindt C. (2021) Heart rate variability biofeedback in chronic disease management: a systematic review. *Complement Ther Med*, 60, 102750, <https://doi.org/10.1016/j.ctim.2021.102750>.
- Frank D.L., Khorshid L., Kiffer J.F., Moravec C.S., McKee M.G. (2010) Biofeedback in medicine: who, when, why and how? *Ment Health Fam Med*, 7(2), 85–91.
- Galván A. (2010) Neural plasticity of development and learning. *Hum Brain Mapp*, 31(6), 879–890, <https://doi.org/10.1002/hbm.21029>.
- Giggins O.M., Persson U.M., Caulfield B. (2013) Biofeedback in rehabilitation. *J Neuroeng Rehabil*, 10, 60, <https://doi.org/10.1186/1743-0003-10-60>.
- Gitler A., Vanacker L., De Couck M., De Leeuw I., Gidron Y. (2022) Neuromodulation applied to diseases: the case of HRV biofeedback. *J Clin Med*, 11(19), 5927, <https://doi.org/10.3390/jcm11195927>.
- Heinrich H., Gevensleben H., Strehl U. (2007) Annotation: neurofeedback – train your brain to train behaviour. *J Child Psychol Psychiatry*, 48(1), 3–16, <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2006.01665.x>.

- [https://aapb.org/Standards\\_for\\_Performing\\_Biofeedback](https://aapb.org/Standards_for_Performing_Biofeedback) Pobrano 5.01.2024.
- Janela D., Costa F., Weiss B., Areias A.C., Molinos M., Scheer J.K., Lains J., Bento V., Cohen S.P., Correia F.D., Yanamadala V. (2023) Effectiveness of biofeedback-assisted asynchronous telerehabilitation in musculoskeletal care: a systematic review. *Digit Health*, 9, <https://doi.org/10.1177/20552076231176696>.
- Kandel E.R., Schwartz J.H., Jessel T.M. (2000) Movement. [W:] Principles of Neural Science (ss. 756–782). McGraw-Hill, International edition.
- Kondo K., Noonan K.M., Freeman M., Ayers C., Morasco B.J., Kansagara D. (2019) Efficacy of biofeedback for medical conditions: an evidence map. *J Gen Intern Med*, 34(12), 2883–2893, <https://doi.org/10.1007/s11606-019-05215-z>.
- Konrad P. (2007) ABC EMG. Praktyczne wprowadzenie do elektromiografii kinetycznej. Gliwice: Technomex.
- Krawiecki Z., Hulewicz A., Cichocki-Kaiser M. (2016) Przetwarzanie i analiza sygnału elektrycznego z mięśni przy użyciu komputerowego stanowiska pomiarowego. *Electr Eng Poznan Univ Technol Acad J*, 88, 35–45.
- Lehrer P., Kaur K., Sharma A., Shah K., Huseby R., Bhavsar J., Sgobba P., Zhang Y. (2020) Heart rate variability biofeedback improves emotional and physical health and performance: a systematic review and meta-analysis. *Appl Psychophysiol Biofeedback*, 45(3), 109–129, <https://doi.org/10.1007/s10484-020-09466-z>. Erratum in: *Appl Psychophysiol Biofeedback*, 2021, 46(4), 389.
- Lehrer P., Vaschillo B., Zucker T., Graves J., Katsamanis M., Aviles M., Wamboldt F. (2013) Protocol for heart rate variability biofeedback training. *Biofeedback*, 41(3), 98–109, <https://doi.org/10.5298/1081-5937-41.3.08>.
- Lin H.T., Li Y.I., Hu W.P., Huang C.C., Du Y.C. (2019) A scoping review of the efficacy of virtual reality and exergaming on patients of musculoskeletal system disorder. *J Clin Med*, 8(6), 791, <https://doi.org/10.3390/jcm8060791>.
- Lüddecke R., Felnhöfer A. (2021) Virtual reality biofeedback in health: a scoping review. *Appl Psychophysiol Biofeedback*, 47(1), 1–15, <https://doi.org/10.1007/s10484-021-09529-9>.
- Maarsingh B.M., Bos J., Van Tuijn C.F.J., Renard S.B. (2019) Changing stress mindset through stressjam: a virtual reality game using biofeedback. *Games Health J*, 8(5), 326–331, <https://doi.org/10.1089/g4h.2018.0145>.
- Malcangi M., Nano G. (2021) Biofeedback: e-health prediction based on evolving fuzzy neural network and wearable technologies. *Evol Syst*, 12, 645–653, <https://doi.org/10.1007/s12530-021-09374-5>.
- Malik K., Dua A. (2022) Biofeedback. [W:] StatPearls. Treasure Island: StatPearls Publishing. Pobrano 2.12.2022 z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK553075/>
- Marzbani H., Marateb H.R., Mansourian M. (2016) Neurofeedback: a comprehensive review on system design, methodology and clinical applications. *Basic Clin Neurosci*, 7(2), 143–158, <https://doi.org/10.15412/J.BCN.03070208>.
- Mazur-Biały A., Tim S., Kołomańska-Bogucka D., Burzyński B., Jurys T., Pławiak N. (2023) Physiotherapy as an effective method to support the treatment of male urinary incontinence: a systematic review. *J Clin Med*, 12(7), 2536, <https://doi.org/10.3390/jcm12072536>.

- Melnikov M.Y. (2021) The current evidence levels for biofeedback and neurofeedback interventions in treating depression: a narrative review. *Neural Plast*, 2021, 8878857, <https://doi.org/10.1155/2021/8878857>.
- Nowak-Gruca A. (2018) Selected legal problems of EEG biofeedback therapy under the Polish law. *Med Law Soc*, 11(1), 13–28, <https://doi.org/10.18690/2463-7955.11.1.13-28>.
- Porges S.W. (2022) Heart rate variability: a personal journey. *Appl Psychophysiol Biofeedback*, 47(4), 259–271, <https://doi.org/10.1007/s10484-022-09559-x>.
- Recker K., Chmielewska K., Patel P., Silliman J., Santana-Rojas L., Hildenbrand A.K., Palit S., Wasserman R.M. (2023) Piloting virtual reality respiratory biofeedback in an intensive outpatient pediatric pain rehabilitation program. *J Pain*, 24(4), 88–89, <https://doi.org/10.1016/j.jpain.2023.02.254>.
- Richardson K.M., Saleh A.A., Jospe M.R., Liao Y., Schembre S.M. (2022) Using biological feedback to promote health behavior change in adults: protocol for a scoping review. *JMIR Res Protoc*, 11(1), e32579, <https://doi.org/10.2196/32579>.
- Rushton A., Calvert M., Wright C., Freemantle N. (2011) Physiotherapy trials for the 21<sup>st</sup> century: time to raise the bar? *J R Soc Med*, 104(11), 437–441, <https://doi.org/10.1258/jrsm.2011.110109>.
- Rutkowski S., Kiper P., Cacciante L., Cieřlik B., Mazurek J., Turolla A., Szczepańska-Gieracha J. (2020) Use of virtual reality-based training in different fields of rehabilitation: a systematic review and meta-analysis. *J Rehabil Med*, 52(11), jrm00121, <https://doi.org/10.2340/16501977-2755>.
- Sackett D.L., Rosenberg W.M., Gray J.A., Haynes R.B., Richardson W.S. (1996) Evidence based medicine: what it is and what it isn't. *BMJ*, 312(7023), 71–72, <https://doi.org/10.1136/bmj.312.7023.71>.
- Sadowski B. (2012) Biologiczne mechanizmy zachowania się ludzi i zwierząt. Warszawa: WN PWN.
- Schwartz M.S., Andrasik F. (2016) Biofeedback. A Practitioner's Guide. 4<sup>th</sup> ed. New York: The Guilford Press A Division of Guilford Publications.
- Sequeira H., Hot P., Silvert L., Delplanque S. (2009) Electrical autonomic correlates of emotion. *Int J Psychophysiol*, 71(1), 50–56, <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2008.07.009>.
- Sequeira H., Viltart O., Ba-M'Hamed S., Poulain P. (2000) Cortical control of somato-cardiovascular integration: neuroanatomical studies. *Brain Res Bull*, 53(1), 87–93, [https://doi.org/10.1016/S0361-9230\(00\)00312-9](https://doi.org/10.1016/S0361-9230(00)00312-9).
- Shaffer F., Ginsberg J.P. (2017) An overview of heart rate variability metrics and norms. *Front Public Health*, 5, 258, <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00258>.
- Shaffer F., McCraty R., Zerr C.L. (2014) A healthy heart is not a metronome: an integrative review of the heart's anatomy and heart rate variability. *Front Psychol*, 5, 1040, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01040>.
- Szewczyk R., Siedlecki M., Ratomska M. (2016) Legal aspects of conducting and using neurotherapy. *Neuropsychiat Neuropsychol*, 11(1), 21–27, <https://doi.org/10.5114/nan.2016.60392>.
- Tomasik T., Windak A., Skalska A., Kulczycka-Życzkowska J., Kocemba J. (1998) Elektrokardiografia dla lekarza praktyka. Kraków: Vesalius.

- Veras M., Kairy D., Paquet N. (2016) What is evidence-based physiotherapy? *Physiother Can*, 68(2), 95–98, <https://doi.org/10.3138/ptc.68.2.GEE>.
- Vernon D.J. (2005) Can neurofeedback training enhance performance? An evaluation of the evidence with implications for future research. *Appl Psychophysiol Biofeedback*, 30(4), 347–364, <https://doi.org/10.1007/s10484-005-8421-4>.
- Wahbeh H., Elsas S.M., Oken B.S. (2008) Mind-body interventions: applications in neurology. *Neurology*, 70(24), 2321–2328, <https://doi.org/10.1212/01.wnl.0000314667.16386.5e>.
- Weiller C., Rijntjes M. (1999) Learning, plasticity, and recovery in the central nervous system. *Exp Brain Res*, 128(1–2), 134–138, <https://doi.org/10.1007/s002210050828>.
- Wolf S.L., Segal R.L. (1990) Conditioning of the spinal stretch reflex: implications for rehabilitation. *Phys Ther*, 70(10), 652–656, <https://doi.org/10.1093/70.10.652>
- Wu X., Zheng X., Yi X., Lai P., Lan Y. (2021) Electromyographic biofeedback for stress urinary incontinence or pelvic floor dysfunction in women: a systematic review and meta-analysis. *Adv Ther*, 38(8), 4163–4177, <https://doi.org/10.1007/s12325-021-01831-6>.
- Wu Z.X., Wang C., Huang Z., Liu X.H., Shen M. (2021) Wrist-hand extension function recovery in spastic hemiplegia patient by botulinum toxin injection plus surface electromyography biofeedback therapy: a case report. *Medicine*, 100(14), e25252, <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000025252>.
- Xie Y.-J., Wang S., Gong Q.-J., Wang J.-X., Sun F.-H., Miyamoto A., Ou X., Wang L., Wang S.-Q., Zhang C. (2021) Effects of electromyography biofeedback for patients after knee surgery: a systematic review and meta-analysis. *J Biomech*, 120, <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2021.110386>.
- Yucha C., Montgomery D. (2008) Evidence-Based Practice in Biofeedback and Neurofeedback. Wheat Ridge: Association for Applied Psychophysiology and Biofeedback.

Kody QR dostępne w niniejszym opracowaniu wygenerowano, korzystając ze strony internetowej: <https://www.websiteplanet.com/pl/webtools/free-qr-code-generator/>