

**Akademia Wychowania Fizycznego  
im. Jerzego Kukuczki w Katowicach**

Magdalena Nitychoruk

**WPLYW TRENINGU EEG BIOFEEDBACK WYKONYWANEGO W  
WARUNKACH NORMOKSJI I HIPOKSJI NORMOBARCZYNEJ NA  
CZAS REAKCJI PROSTEJ I ZŁOŻONEJ  
U ZAWODNIKÓW JUDO**

Rozprawa na stopień doktora nauk o kulturze fizycznej

Promotor  
prof. dr hab. Adam Maszczyk

Promotor pomocniczy  
dr Paweł Dobrakowski

**Katowice 2024**

## 1. Wprowadzenie

Przygotowanie wytrzymałościowe, siłowe, techniczne oraz taktyczne zawodników sportów wyczynowych jest obecnie na bardzo wysokim poziomie. Wobec tego poszukuje się nowych innowacyjnych metod, które wpłyną pozytywnie na proces szkolenia sportowców, zwiększą ich efektywność, a ostatecznie pomogą zmaksymalizować wydajność sportowca podczas rywalizacji sportowej.

Czas reakcji odgrywa decydującą rolę w wielu dyscyplinach sportowych, dlatego kształtowanie i rozwój tej zdolności należy do priorytetów procesu treningowego. W sporcie, takim jak judo, gdzie uwaga wizualna oraz jej wkład w proces podejmowania decyzji i planowania właściwej odpowiedzi motorycznej ma kluczowe znaczenie dla powodzenia działań zawodnika, wysoki poziom koncentracji i zdolność do szybkiego reagowania na bodźce przeciwnika jest szczególnie ważna. Ze względu na szybkie tempo podczas walki oraz dynamicznie zmieniającą się sytuację na macie, a także złożoność i precyzję ruchów zawodników, decydującym czynnikiem w walce jest reakcja na bodźce przeciwnika. Dlatego też wskazanym jest, aby w procesie treningowym judoków dążyć do doskonalenia umiejętności właściwego skupiania uwagi, aby usprawnić ich mechanizmy przetwarzania wzrokowego oraz poprawić czas reagowania na bodźce.

Wysoka koncentracja i związana z nią wzmożona czujność zawodników, osiągnana w warunkach optymalnego pobudzenia ich układu nerwowego, usprawnia przebieg procesów poznawczych oraz wpływa na skrócenie ich czasów reakcji (Kaur i wsp. 2006, Rietjens i wsp. 2005, Decroix i wsp. 2016, Le Meur i wsp. 2013). Jedną z innowacyjnych metod poprawiającą czas reakcji jest trening EEG Biofeedback (EEG-BF). EEG Biofeedback jest metodą diagnostyczno-terapeutyczną polegającą na dostarczaniu badanemu bieżących informacji o zmianach fizjologicznych zachodzących w jego organizmie (Malik i Dua 2020, Schwartz 1979, Yu i wsp 2018). Jest bezpieczną, nieinwazyjną metodą stosowaną początkowo w rehabilitacji, a następnie stopniowo rozszerzaną w treningu sportowym (Frank i wsp. 2010, Jacini i wsp. 2018, Malik i Dua 2020). Istnieje wiele doniesień na temat poprawy czasu reakcji po zastosowaniu treningu EEG Biofeedback, jednak znacznie różnią się one wykorzystanymi protokołami badawczymi (Gruzelier i wsp. 2006, Beauchamp i wsp. 2012, Bielas, Michalczyk 2001, Horvath i wsp. 2023, Mikicin 2015).

W doniesieniach naukowych wykazano korzystne zmiany wpływu hipoksji na poprawę zdolności buforowych krwi, wzrost aktywności enzymów oksydacyjnych i glikolitycznych, wzrost kapilaryzacji włókien mięśniowych, poprawę pojemności glikolitycznej, oraz zwiększenie zawartości mioglobiny w mięśniach (Dufour i wsp. 2006, Zoll i wsp. 2006, Vogt i wsp. 2001). W związku z tym zaczęto wykorzystywać warunki hipoksji normobarycznej w celach rehabilitacyjnych, aby zmniejszyć powikłania udaru niedokrwiennego (Stowe i wsp. 2011, Monson i wsp. 2014, Selvaraj i wsp. 2017), ale także w celu zmniejszenia czynników ryzyka chorób naczyniowo-mózgowych (Lyamina i wsp. 2011, Urdampilleta i wsp. 2012, Serebrovska i wsp. 2017). Istnieją analizy mówiące o pozytywnym wpływie treningu w środowisku hipoksji normobarycznej na optymalizację stanu funkcjonalnego sportowców oraz wzrost ich wydajności podczas zawodów (Bolotin, Bakajew 2017a, Bołotin, Bakajew 2017b, Bołotin, Bakajew 2017c). Co więcej, połączenie łagodnego niedotlenienia i treningu aerobowego wydaje się poprawiać funkcje poznawcze u osób starszych (Schega 2016). W badaniu przeprowadzonym przez Loprinzi i wsp. (2019) zaobserwowano pozytywny wpływ ostrej hipoksji normobarycznej na zakłócenia pamięci (Loprinzi 2019). Jednak istnieją liczne badania, które wykazały, że niedotlenienie normobaryczne na różnych symulowanych wysokościach ma szkodliwy wpływ na czas reakcji i poziom błędów podczas wydajności poznawczej. Chociaż niedotlenienie może prowadzić do postępujących zaburzeń metabolizmu mózgu, powodując późniejsze zaburzenia funkcji poznawczych, może również indukować syntezę katecholamin i neurotrofin, takich jak neurotroficzny czynnik pochodzenia mózgowego (BDNF) czy czynnik wzrostu śródbłonna naczyniowego (VEGF), a także przyspieszać mózgowy przepływ krwi (CBF), pozytywnie wpływając na neurogenezę i unaczynienie mózgu (McMorris 2017, Taylor 2015, Virues-Ortega 2004). Niedotlenienie może indukować uwalnianie BDNF, istotnego dla tworzenia i wzmacniania pamięci; dlatego można oczekiwać pozytywnego efektu (Wang 2006). Ponadto bezpośrednio po ekspozycji na hipoksję można spodziewać się efektu reperfuzji, a co za tym idzie poprawy funkcji poznawczych, co opisano już na modelach zwierzęcych (Guo 2016), a także u ludzi (Bayer 2017, Jung 2018, Serebrovska 2019, Shimada 2019).

Badania w zakresie wpływu hipoksji normobarycznej na poprawę funkcji poznawczych są niejednoznaczne. Coraz więcej nowych dowodów sugeruje jednak, że umiarkowane niedotlenienie może nie mieć niekorzystnego wpływu na funkcje poznawcze (Davranche i wsp. 2016, Morrison i wsp. 2019, Sun i wsp. 2019). Należy zwrócić uwagę na wcześniej opisaną dużą indywidualną odpowiedź na ekspozycję na hipoksję (Chapman 2013, Friedman 2007).

Wydaje się również, że reakcja na ekspozycję na hipoksję normobaryczną jest w dużej mierze zależna od trybu i protokołu hipoksji (hipobaryczny/normobaryczny, przerywany/ciągły), wieku uczestników, poziomu sprawności i stanu zdrowia, typu zadania poznawczego, czasu wykonanego testu po badaniach i innych czynników zakłócających analizy (McMorris 2017, Friedmann 2005, Navarrete-Opazo 2014, Rodriguez 2000, Twomey 2017). Konieczne jest dostosowanie właściwego czasu ekspozycji czy też ustalenie odpowiedniego wysycenia krwi tlenem, co może być kluczowym czynnikiem, aby odpowiedź na ekspozycję na hipoksję była pozytywna (Rybnikova 2005, Zhu 2010).

Celem niniejszej pracy była ocena wpływu warunków normoksji oraz hipoksji normobarycznej w celu poprawy czasów reakcji prostej i złożonej u zawodników judo oraz poszerzenie dotychczasowej wiedzy dotyczącej skuteczności zastosowania szkolenia EEG-BF w sporcie wyczynowym, a także opracowanie optymalnego protokołu treningowego, wykorzystującego elektroencefalografię (EEG) oraz biologiczne sprzężenie zwrotne.

## **2. Cel badań**

Analizując dotychczasową literaturę oceniającą skuteczność treningu EEG-BF w celu poprawy czasu reakcji u zawodników sportów wyczynowych mamy do czynienia z ograniczoną liczbą zarówno badań jak i protokołów treningowych. Dostępne doniesienia naukowe analizujące wpływ treningu EEG-BF na zwiększenie amplitudy fali beta były stosowane do poprawy funkcji poznawczych u osób starszych (Staufenbiel i wsp. 2013) lub umiejętności utrzymania uwagi u dorosłych (Jurewicz, Paluch, Kublik, Mikicin i Wróbel 2018). Istnieją również badania potwierdzające, że większa amplituda fal beta (szczególnie w obszarach ciemieniowych) przed ekspozycją bodźca wzrokowego związana była z krótszymi czasami reakcji (Kamiński i wsp. 2012). Badania te nie miały jednak celu poprawy czasu reakcji u wyczynowych zawodników. Biorąc pod uwagę ramy koncepcyjne dostarczone przez Wróbla (2000, 2014) oraz brak badań nad skutecznością EEG-BF we wzmacnianiu amplitudy pasma beta jako poprawy czasu reakcji u wyczynowych zawodników judo, nasze badanie można uznać za pomoc w wypełnieniu tej luki.

Zatem, celem prowadzonych badań była ocena wpływu treningu EEG biofeedback w warunkach normoksji oraz hipoksji normobarycznej na czas reakcji prostej i złożonej u zawodników judo oraz określenie optymalnego treningu ze względu na częstotliwość sesji oraz warunki wykonywania treningu istotnie polepszające czas reakcji w badanych grupach zawodników.

## 2.1 Pytania badawcze

Uwzględniając cele prowadzonych badań, w pracy postawione zostały następujące pytania badawcze:

- 1) Jak przedstawiała się dynamika zmienności przyrostów względnych wartości amplitud fal Theta i Beta uzyskanych podczas treningów biofeedback w normoksji i hipoksji normobarycznej?
- 2) Jak przedstawiała się dynamika zmienności przyrostów względnych dynamiki wartości czasu reakcji prostej i złożonej przed i po treningach biofeedback w testach wiedeńskich?
- 3) W jakim zakresie przeprowadzone treningi EEG biofeedback w warunkach normoksji wpłynęły na czas reakcji w badanych grupach zawodników judo?
- 4) Która z zastosowanych procedur treningowych EEG biofeedback w aspekcie częstotliwości ich realizacji oraz z uwzględnieniem warunków ich odbywania, istotnie wpływa na poprawę czasu reakcji prostej oraz złożonej w badanych grupach zawodników judo?

## 2.2 Hipotezy badawcze

Analizując powyższe pytania badawcze oraz uwzględniając dotychczasowe ustalenia naukowe, sformułowano następujące hipotezy badawcze:

1. Dynamika zmienności przyrostów względnych wartości amplitudy fali Theta uzyskana podczas treningów biofeedback w normoksji i hipoksji normobarycznej wykazała trend spadkowy, a wartości amplitudy fali Beta trend wzrostowy.
2. Największą dynamikę zmienności przyrostów względnych wartości testów wiedeńskich reakcji prostej i złożonej w warunkach normoksji zauważono po zastosowaniu treningu EEG biofeedback w badanych grupach zawodników.
3. Przeprowadzone treningi EEG biofeedback w warunkach normoksji wpłynęły istotnie statystycznie na czas reakcji w badanych grupach zawodników judo.
4. Trening wykonywany co drugi dzień w warunkach normoksji istotnie statystycznie wpływa na poprawę czasu złożonej po zastosowaniu treningu EEG biofeedback, natomiast trening wykonywany codziennie w warunkach normoksji wpływa na poprawę czasu reakcji prostej w badanych grupach zawodników.

### **3. Materiał i metody badań**

#### **3.1 Charakterystyka badanych**

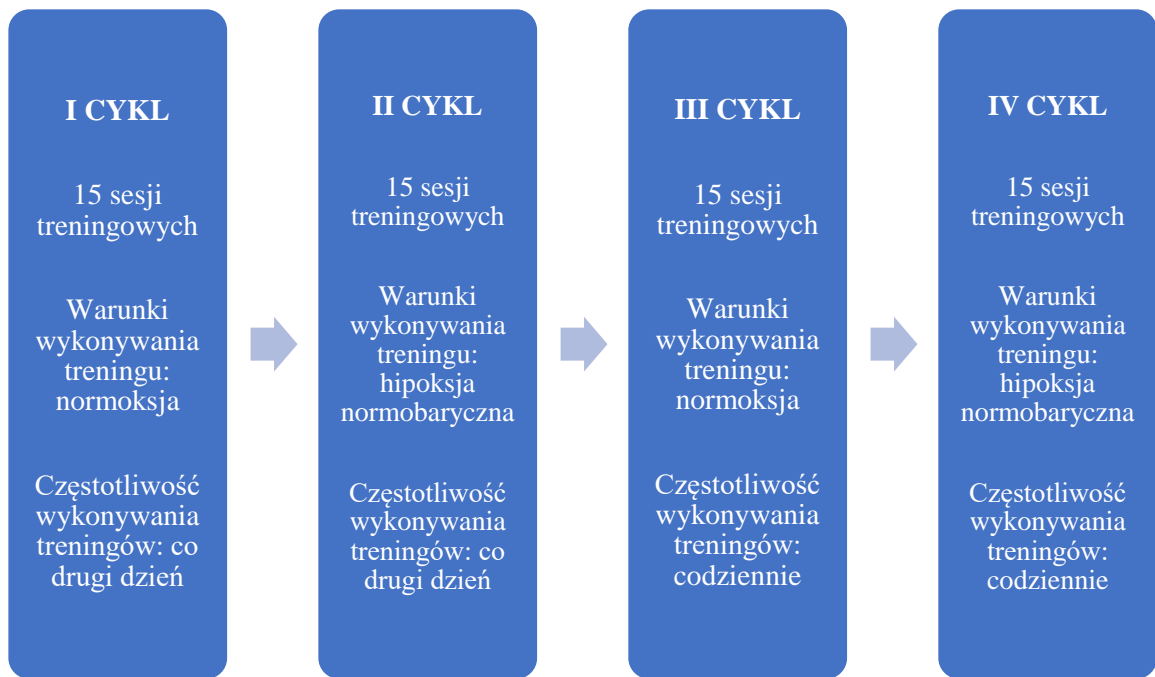
W badaniach wzięło udział 20 mężczyzn uprawiających judo posiadających klasę Międzynarodową Mistrzowską (MM). Podstawowym kryterium udziału w badaniach był przynajmniej 6-letni staż treningowy i minimum 6-miesięczna karencja od treningu wysokościowego. Wszyscy badani posiadali aktualne badania lekarskie, potwierdzające dobry stan zdrowia i zdolność do wykonywania intensywnych wysiłków fizycznych. Badania zostały przeprowadzone podczas kolejnych dwóch okresów przygotowawczych, po głównych zawodach sezonów 2021 i 2022. Wykonywano pomiary zawsze o stałej porze porannej – od godziny 10.00 do godziny 14.00, a każdy zawodnik był badany indywidualnie. Badani zostali poinstruowani, aby podczas cykli treningowych nie przyjmować kofeiny, ani substancji pobudzających takich jak energetyki.

Badanych podzielono losowo na grupę badaną (grupa GB) ( $n = 10$ ; wiek  $19,6 \pm 1,4$  lat; wysokość ciała  $182,2 \pm 5,1$  cm; masa ciała  $78,6 \pm 7,9$  kg; procentowa zawartość tkanki tłuszczowej, %FAT  $10,1 \pm 5,7\%$ ), którą poddano treningowi w warunkach hipoksji normobarycznej, oraz grupę kontrolną (grupa GK) ( $n = 10$ ; wiek  $20,1 \pm 1,6$  lat; wysokość ciała  $182,1 \pm 4,5$  cm; masa ciała  $74,1 \pm 6,1$  kg; %FAT  $8,8 \pm 1,7\%$ ) realizującą trening w warunkach normoksji.

Przed przystąpieniem do badań wszyscy zawodnicy zostali poinformowani o celu i przebiegu badań oraz udzielili pisemnej zgody na udział w badaniach. Badani zostali także poinformowani o możliwości rezygnacji z dalszego udziału w eksperymencie na dowolnym etapie jego trwania, bez podania przyczyny. Projekt badawczy został zrealizowany w ramach grantu N RSA3 03953, N RSA4 04054 i został zaakceptowany przez Komisję Bioetyki ds. Badań Naukowych przy Akademii Wychowania Fizycznego w Katowicach. Badania przeprowadzone zostały w Pracowni Psychomotoryczności Człowieka oraz Pracowni Hipoksji Akademii Wychowania Fizycznego im. Jerzego Kukuczki w Katowicach.

#### **3.2 Protokoły badawcze**

Badania przeprowadzone zostały w czterech cyklach zróżnicowanych pod względem częstotliwości trwania sesji EEG biofeedback oraz warunków w których się odbywały (normoksja/hipoksja normobaryczna) zarówno w grupie badawczej, jak i kontrolnej.



**Ryc. 1** Cykle badań

W pierwszym cyklu badań przeprowadzano treningi EEG biofeedback w warunkach normoksji co 2 dzień. W kolejnym cyklu częstotliwość treningów pozostała taka sama, zastosowano natomiast warunki hipoksji normobarycznej. W trzecim cyklu badań treningi w normoksji odbywały się ze zwiększoną częstotliwością i przeprowadzone były codziennie. Podobną częstotliwość zastosowano w czwartym cyklu badań, w którym zawodnicy trenowali w warunkach hipoksji. Treningi w warunkach symulowanej hipoksji wykonano w pomieszczeniu wyposażonym w system wytwarzania hipoksji normobarycznej (LOS-HYP1/3NU, Lowoxygen Systems, Niemcy). Realizowane były na symulowanej wysokości 2500 m n.p.m. ( $FiO_2 = 15,5\%$ ), co jest sugerowaną wysokością, która nie wpływa na upośledzenie funkcji poznawczych (Pavlicek i wsp. 2005, Taylor i wsp. 2016, Buck i wsp. 1998, Otis i wsp. 1989). Każdy cykl badań obejmował 15 spotkań treningowych po których następowała czterotygodniowa przerwa jako modyfikacja treningu Thompsona (Thompson 2003). Czas trwania sesji treningowych w warunkach hipoksji normobarycznej wynosił 20 minut, co jest sugerowanym czasem, który nie wpływa na zaburzenie funkcji poznawczych (Pavlicek i wsp. 2005, Taylor i wsp. 2016). Podstawowym protokołem treningowym w grupie badawczej był trening theta/beta1, służący zwiększaniu koncentracji oraz osiągnięciu tzw. wąskiej uwagi przez zawodników. Badania w grupie kontrolnej przebiegały według takiego samego schematu, jak w grupie badanej i charakteryzowały się taką samą cyklicznością, czasem

trwania i częstotliwością sesji treningowych EEG biofeedback. Procedura przygotowawcza do treningu była jednakowa dla obydwu grup, jednak w grupie kontrolnej zamiast realizowania protokołu theta/beta1, wyświetlana była symulacja EEG, niezależna od wytwarzanych wzorców fal mózgowych trenującego. Badania w grupie kontrolnej przeprowadzone zostały jedynie w warunkach normoksji.

### **3.2.1 Zapis EEG**

Trening biofeedback wykonywany był przy użyciu oprogramowania EEG DigiTrack wyposażony w głowicę ExG-32. Jakość urządzenia potwierdzona została certyfikatem ISO oraz certyfikatem medycznym CE. Przed przystąpieniem do rejestracji sygnału EEG każdorazowo sprawdzano poziom impedancji elektrod oraz międzyelektrodowy za pomocą wbudowanego czujnika impedancji. Warunkiem rozpoczęcia diagnozy oraz treningu EEG biofeedback było uzyskanie poziomu impedancji poniżej 5 k $\Omega$  oraz pomiaru między elektrodami różniącego się od siebie nie więcej niż o 1 k $\Omega$ . Każda sesja treningowa w poszczególnych cyklach została poprzedzona wykonaniem 5 – minutowej jednokanałowej diagnozy. W tym czasie osoba badana proszona była o wykonanie następujących czynności: pozostawanie w pozycji siedzącej z oczami otwartymi przez okres jednej minuty, pozostawanie w pozycji siedzącej z oczami zamkniętymi przez okres jednej minuty, pozostanie w pozycji siedzącej z oczami otwartymi z dodatkowym zadaniem aktywizującym w postaci odliczania od tyłu co 7 od 100. W czasie diagnozy elektroda referencyjna umieszczana była na lewym płątku ucha, uziemienie na prawym, a elektroda aktywna w punkcie Cz, zgodnie z międzynarodowym systemem 10 – 20. Podczas badania sygnał EEG rejestrowano z punktu C3 na skórze głowy za pomocą elektrody Ag/AgCl (Blue Sensor SP, Ambu). Zbieranie sygnału z punktu C3, znajdującego się w obszarze kory przedczołowej, co umożliwiło realizację głównego celu szkolenia, jakim było kształtowanie zdolności utrzymywania optymalnej równowagi pomiędzy amplitudą fal szybkich (beta) oraz fal wolnych (theta), odpowiedzialnych za osiągnięcie stanu koncentracji oraz skupienia przez zawodnika. Aktywne elektrody zostały ułożone stosując rozciągliwy czepek z lycry zgodnie z systemem 10-20 (Jasper 1958). Pod elektrody nałożono żel przewodzący za pomocą tępej igły, a do czyszczenia miejsc po elektrodach użyto kremu ściernego (Nuprep, Weaver and Company) i chusteczek nasączonych alkoholem.



### 3.2.2 Trening EEG Biofeedback

Uczestnicy badania każdorazowo bezpośrednio przed zadaniem zostali poproszeni o wypełnienie kwestionariusza do Pomiaru Nastroju i Sześciu Emocji, który służył do interpretacji uzyskanych wyników przez neurologa, który na ich podstawie decydował o kwalifikacji do treningu (Wojciszke i Baryła 2004). Badani wykonywali także każdorazowo testy szybkości reakcji. Następnie wykonywano trening EEG Biofeedback w warunkach normoksji lub hipoksji normobarycznej. Podczas każdej sesji badani siedzieli na krześle zwróceniu w stronę 17-calowego monitora LCD komputera w odległości 70cm, na którym wyświetlona została animacja EEG Biofeedback. Uczestników poinstruowano, aby unikali ruchów głowy, a impedancja elektrod była stale monitorowana. Sesja rozpoczynała się po zamontowaniu elektrod EEG, po czym następował 2-minutowy okres odpoczynku mający na celu przyzwyczajenie uczestników do sytuacji treningowej i rejestrował nie treningową próbkę sygnału EEG.

Trening EEG-BF polegał na rejestracji aktywności neuronalnej wygenerowanej przez komórki nerwowe w postaci impulsów elektrycznych, których wypadkowa za pomocą elektrod jest przetwarzana w programie komputerowym na wartości amplitudowe w poszczególnych zakresach częstotliwości. Każdy zawodnik podczas treningu EEG-BF miał do wykonania to samo zadanie polegające na sterowaniu obrazem na monitorze w ten sposób, aby samochód na animacji poruszał się po drodze. Ruch samochodu następuje na skutek treningu EEG-BF gdy rejestrowana jest moc sygnału EEG z dwóch elektrod C3 i C4 (zgodnie z międzynarodowym systemem 10-20) w paśmie Beta oraz Teta. Gdy amplituda fal zmieniała się w zamierzonym kierunku – samochód poruszał się. Próg definiujący z wymaganą wartością amplitudy fali Beta oraz Theta przedstawiony został jako pozioma linia na wykresie, aby podczas sesji próg był utrzymywany powyżej górnej granicy amplitudy pasma Beta, a poniżej dolnej granicy pasma Theta, aby zapewnić względnie stały poziom nagrody dla wszystkich osób badanych. Ćwiczący koncentrował się na zadaniu pojawiającym się na monitorze otrzymując informację zwrotną o poziomie aktywności bioelektrycznej z tego obszaru mózgu który objęty jest rejestracją. Kiedy udawało mu się osiągnąć pożądaną wzorzec częstotliwości bioelektrycznej mózgu zdobywał punkty, które były rejestrowane za pomocą sygnału dźwiękowego, a w przypadku gdy dominowały pasma o niepożądanych częstotliwościach, punkty nie były przyznawane. Sygnały aktywności mózgowej były przetwarzane tak aby doprowadzić do sprzężenia zwrotnego między obserwacją wizualną i foniczną, a reakcją bioelektryczną mózgu ćwiczącego. W efekcie dochodziło do wystąpienia sprzężenia zwrotnego dzięki któremu czynność bioelektryczna

mózgu (aktywność neuronów) zmieniała się do oczekiwanego poziomu. Od razu po zakończeniu treningu EEG Biofeedback wykonano testy czasów reakcji z wybranych prób Wiedeńskiego Systemu Testowego (WST).

### **3.2.3 Testy czasu reakcji**

Wpływ treningu EEG Biofeedback na czas reakcji zawodników judo sprawdzano za pomocą wybranych prób Wiedeńskiego Systemu Testowego (WST). Testy odbywały się bezpośrednio przed treningiem EEG Biofeedback, od razu po szkoleniu. Wszystkie próby powtarzane były dwukrotnie w odstępach 5 – minutowych, przy uwzględnieniu lepszego wyniku z dwóch pomiarów. Za pomocą urządzenia do badania czasu reakcji (RT), będącego składową Wiedeńskiego Systemu Testowego, sprawdzano reakcję prostą na bodźce wzrokowe. Zadaniem osoby badanej było jak najszybsze przeniesienie dłoni z tzw. „klawisza spoczynku” i wciśnięcie „klawisza reakcji” w momencie zapalenia się żółtej diody. Na podstawie otrzymanych danych obliczono średnią czasu reakcji w sekundach. Czas reakcji złożonej natomiast sprawdzany był za pomocą urządzenia do badania decyzji (DG), gdzie wykonywana próba wymagała jak najszybszego wciśnięcia odpowiedniego klawisza – uzależnionego od koloru zapalającej się diody – w momencie pojawienia się bodźca. Program wskazywał wszystkie reakcje prawidłowe, nieprawidłowe, średnią czasu reakcji oraz odchylenie standardowe średniej czasu reakcji. Sygnał pojawiał się 15 razy.

### **3.3 Metody statystyczne**

W celu scharakteryzowania struktury badanych zmiennych obliczono podstawowe statystyki opisowe w postaci miar położenia – średniej arytmetycznej ( $\bar{x}$ ) i miar zmienności – odchylenia standardowego ( $S$ ). Zarówno wyniki jak i dane wejściowe przedstawiono w postaci rekordów w macierzy tablicowej.

Rozkłady badanych zmiennych zweryfikowano testem normalności rozkładu Shapiro-Wilka. Jednorodność wariancji sprawdzono testem Levene’a. Podsumowując, wszystkie wariancje zmiennych miały rozkład normalny z niewielkimi odchyleniami lewo lub prawostronnymi, mieszczącymi się jednak w zakresach normalności. Dodatkowo, sprawdzono poziom istotności dla testu Mauchley’a. Ponieważ wyniki były nieistotne statystycznie oznaczało to, że zachodzi sferyczność wariancji.

W pierwszym etapie badań empirycznych, w celu zbadania dynamiki zjawiska, wykorzystane przyrosty względne jednopodstawowe, w których rozpatrywane były wartości analizowanych zmiennych w funkcji czasu oraz określono siłę efektu procesu treningowego z wykorzystaniem miary Eta-kwadrat ( $\eta^2$ ). Wprowadzając numerację jednostek czasu  $t=0$  do  $t=n-1$  oraz podporządkowując tym numerom zaobserwowane poziomy badanego zjawiska, uzyskano tzw. Realizację procesu stochastycznego w funkcji czasu oraz określono siłę efektu według założenia dla  $\eta^2$  w zakresie 0.01 – efekt mały, 0.06 – efekt przeciętny, 0.14 – efekt duży (Sobczyk, 2002, Snarska, 2005).

Wielkości oraz kierunki trendów wyznaczone zostały z zastosowaniem średniej ruchomej (prostej) według wzoru:

$$y = \frac{1}{k} \sum_{i=t-k}^{t-1} y_i$$

gdzie:

$y$  – prognoza zmiennej  $Y$  wyznaczona na okres  $t$ ,

$k$  -stała wygładzania (w omawianym przypadku 3 dla średniej trzelementowej)

$y_i$ - wartość prognozowanej okresie  $i$ .

Funkcję trendu określono w odniesieniu do wzoru:

$$f(t) = a + b \cdot t$$

gdzie:

$a$  – wartość trendu w okresie 0,

$b$  – przeciętny okresowy przyrost ( $b>0$ ) lub spadek ( $b<0$ ) trendu,

$t$  – zmienna czasu.

W dalszym etapie analiz, w celu weryfikacji istotności różnic pomiędzy grupami zastosowano analizę wariancji (ANOVA) z powtarzanymi pomiarami. W sytuacji stwierdzenia istotności różnic, wykonano dalszą analizę testem post-hoc Tukeya. Została zaprezentowana statystyka  $F$  i poziom istotności. Dla wszystkich analiz przyjęto poziom istotności statystycznej  $p<0,05$ . Wszystkie obliczenia przeprowadzono przy pomocy pakietu Statistica v.13 (StatSoft, 2021).

## 4. Wyniki

### 4.1 Analiza dynamiki zmienności wartości amplitudy fal Theta i Beta uzyskanych po treningach biofeedback w normoksji i hipoksji normobarycznej, w grupie badanej i kontrolnej

**Tabela 1** Przyrosty względne zmiennych Theta i Beta (średnie z okresów treningowych), jednopodstawowe i siła efektu po treningowego w grupie badanej (GB), cykl I-II

<b>I cykl pomiarowy</b>			
<b>Zmienna Theta - normoksja</b>			
Trening	Wartości rzeczywiste [ $\mu$ V]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$ po wszystkich okresach
Okres 1	8,00	-0,25	
Okres 2	7,91	-1,34	
Okres 3	7,84	-2,24	0,07
Okres 4	7,75	-3,30	
Okres 5	7,68	-4,21	
<b>Zmienna Beta - normoksja</b>			
Trening	Wartości rzeczywiste [ $\mu$ V]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$ po wszystkich okresach
Okres 1	4,35	1,30	
Okres 2	4,48	4,32	
Okres 3	4,54	5,78	0,18
Okres 4	4,59	6,85	
Okres 5	4,64	7,97	
<b>II cykl pomiarowy</b>			
<b>Zmienna Theta - hipoksja</b>			
Trening	Wartości rzeczywiste [ $\mu$ V]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$ po wszystkich okresach
Okres 1	9,24	-0,90	
Okres 2	8,95	-4,04	
Okres 3	8,79	-5,72	0,12
Okres 4	8,62	-7,57	
Okres 5	8,53	-8,54	
<b>Zmienna Beta - hipoksja</b>			
Trening	Wartości rzeczywiste [ $\mu$ V]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$ po wszystkich okresach
Okres 1	4,69	1,58	
Okres 2	4,86	5,30	
Okres 3	4,94	7,00	0,21
Okres 4	5,09	10,40	
Okres 5	5,11	10,67	

**Tabela 2** Przyrosty względne zmiennych Theta i Beta (średnie z okresów treningowych), jednopodstawowe i siła efektu po treningowego w grupie badanej (GB), cykl III-IV

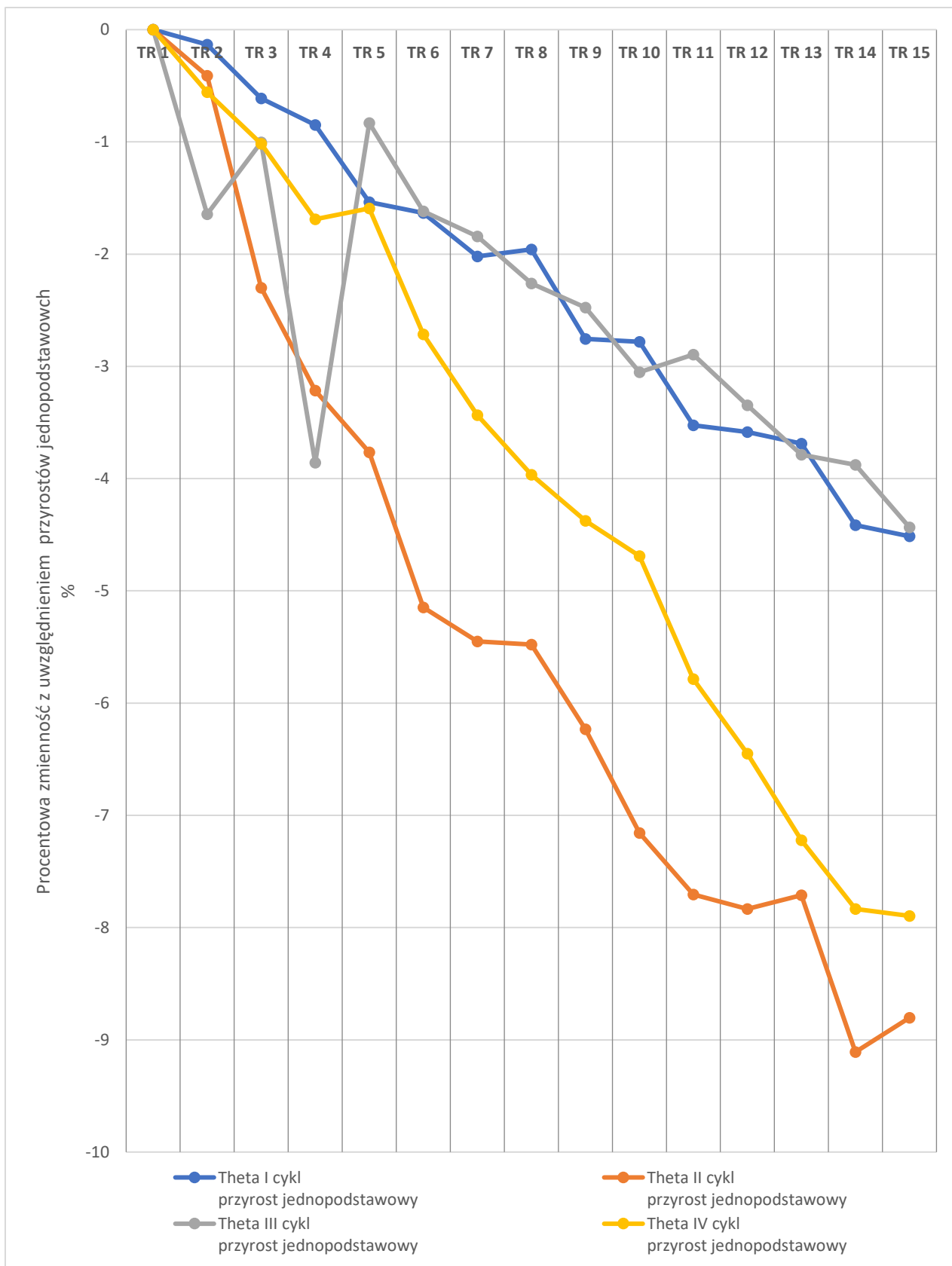
<b>III cykl pomiarowy</b>			
<b>Zmienna Theta - normoksja</b>			
Trening	Wartości rzeczywiste [ $\mu$ V]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$ po wszystkich okresach
Okres 1	8,28	-0,88	0,04
Okres 2	8,18	-2,10	
Okres 3	8,17	-2,19	
Okres 4	8,10	-3,10	
Okres 5	8,02	-4,03	
<b>Zmienna Beta - normoksja</b>			
Trening	Wartości rzeczywiste [ $\mu$ V]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$ po wszystkich okresach
Okres 1	4,05	-0,78	0,22
Okres 2	4,10	0,44	
Okres 3	4,24	3,90	
Okres 4	4,29	5,06	
Okres 5	4,45	8,85	
<b>IV cykl pomiarowy</b>			
<b>Zmienna Theta - hipoksja</b>			
Trening	Wartości rzeczywiste [ $\mu$ V]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$ po wszystkich okresach
Okres 1	9,74	-0,52	0,13
Okres 2	9,60	-2,00	
Okres 3	9,41	-3,93	
Okres 4	9,24	-5,64	
Okres 5	9,05	-7,65	
<b>Zmienna Beta - hipoksja</b>			
Trening	Wartości rzeczywiste [ $\mu$ V]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$ po wszystkich okresach
Okres 1	5,36	0,29	0,25
Okres 2	5,59	4,57	
Okres 3	5,74	7,52	
Okres 4	5,93	11,01	
Okres 5	6,07	13,61	

Charakterystyka uzyskiwanych wartości przyrostów względnych zmiennych w aspekcie indeksów jednopodstawowych i siły efektu po treningowego przedstawiona została w tabelach, osobno dla grupy badanej (GB), jak i kontrolnej (GK). Ze względu na ilość treningów podzielono wyniki na okresy ( w każdym okresie zawierały się trzy treningi), otrzymując pięć

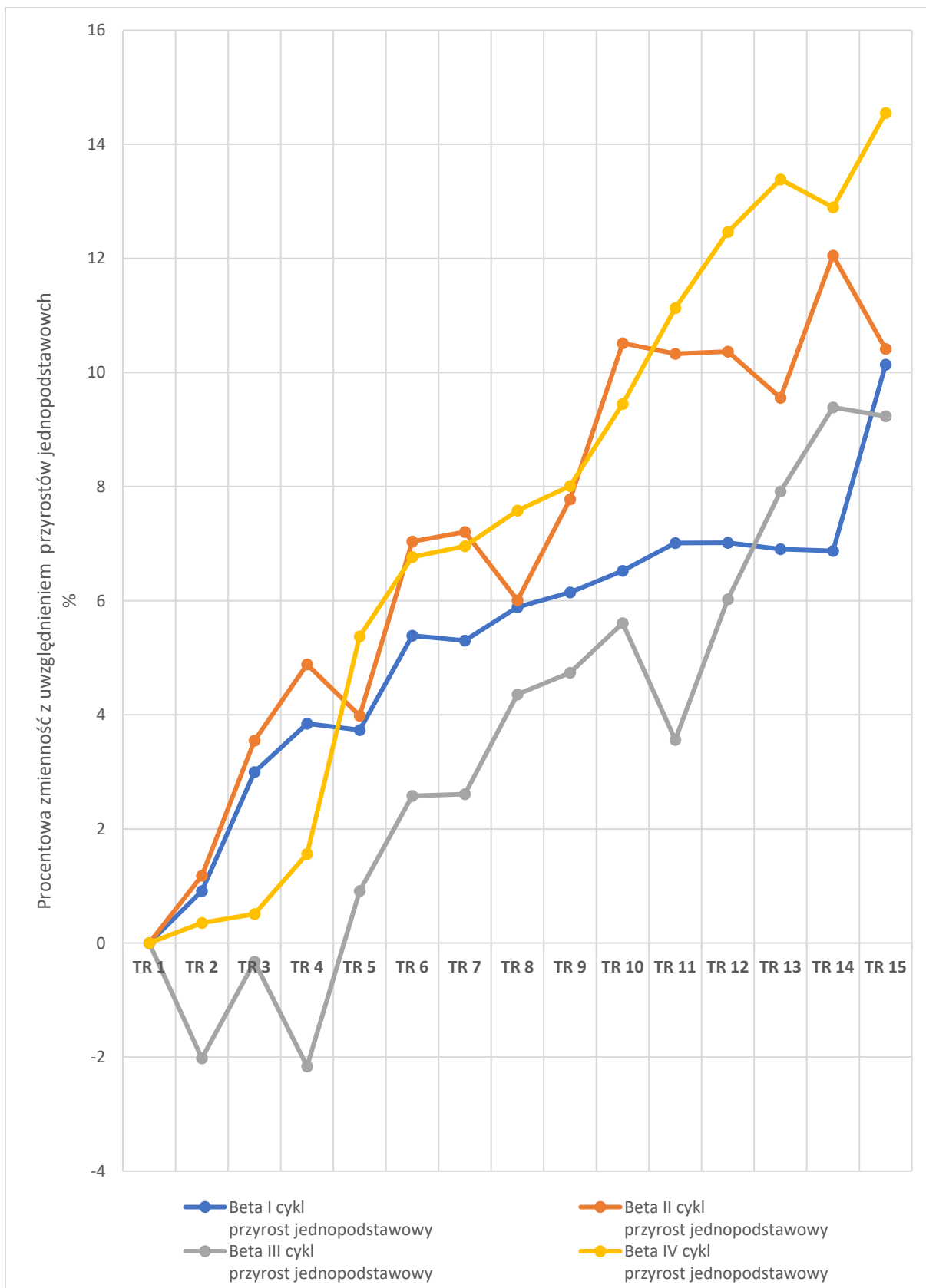
wartości średnich dla indeksów jednopodstawowych (Tabele 9-10 dla GB oraz tabele 11-12 dla GK). Graficzną analizę rozkładu przyrostów względnych jednopodstawowych fal Theta i Beta w ujęciu porównawczym poszczególnych cykli, zaprezentowano na rycinach 2-3 dla GB oraz rycinach 4-5 dla GK.

W I cyklu pomiarowym dla zmiennej Theta z uwzględnieniem przyrostów względnych w grupie badanej wykazano trend spadkowy i jej wartość obniżyła się o 4,21%. Dla zmiennej Beta wykazano wzrostowy osiągając 7,97% przyrostu wartości pod koniec cyklu. Natomiast w II cyklu pomiarowym dla zmiennej Theta z uwzględnieniem przyrostów względnych w grupie badanej wykazano trend spadkowy i jej wartość obniżyła się o 8,54%. Dla zmiennej Beta wykazała trend wzrostowy osiągając 10,67% przyrostu wartości pod koniec cyklu (Tabela 9).

W III cyklu pomiarowym dla zmiennej Theta z uwzględnieniem przyrostów względnych w grupie badanej wykazano trend spadkowy i jej wartość obniżyła się o 4,03%. Dla zmiennej Beta wykazano trend wzrostowy osiągając 8,85% przyrostu wartości pod koniec cyklu (Tabela 10). W IV cyklu pomiarowym dla zmiennej Theta z uwzględnieniem przyrostów względnych w grupie badanej wykazano trend spadkowy i jej wartość obniżyła się o 7,65%. Dla zmiennej Beta wykazano trend wzrostowy osiągając 13,67% przyrostu wartości pod koniec cyklu (Tabela 10).



**Ryc. 2** Szczegółowy rozkład zmienności fal Theta po poszczególnych treningach biofeedback w kolejnych cyklach treningowych- wartości przyrostów względnych jednopodstawowych (procent zmian) – GB.



**Ryc. 3** Szczegółowy rozkład zmienności fal Beta po poszczególnych treningach biofeedback w kolejnych cyklach treningowych- wartości przyrostów względnych jednostawowych (procent zmian) – GB.



**Tabela 3** Przyrosty względne zmiennych Theta i Beta (średnie z okresów treningowych), jednopodstawowe i siła efektu po treningowego w grupie kontrolnej (GK), cykl I-II

<b>I cykl pomiarowy</b>			
<b>Zmienna Theta - normoksja</b>			
Trening	Wartości rzeczywiste [ $\mu$ V]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$ po wszystkich okresach
Okres 1	9,32	-0,09	
Okres 2	9,13	-2,16	
Okres 3	9,10	-2,47	0,04
Okres 4	9,04	-3,11	
Okres 5	8,98	-3,77	
<b>Zmienna Beta - normoksja</b>			
Trening	Wartości rzeczywiste [ $\mu$ V]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$ po wszystkich okresach
Okres 1	3,35	-0,46	
Okres 2	3,28	-2,70	
Okres 3	3,40	0,93	0,19
Okres 4	3,41	1,09	
Okres 5	3,63	7,61	
<b>II cykl pomiarowy</b>			
<b>Zmienna Theta - hipoksja</b>			
Trening	Wartości rzeczywiste [ $\mu$ V]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$ po wszystkich okresach
Okres 1	10,21	-0,81	
Okres 2	9,98	-3,00	
Okres 3	9,81	-4,62	0,14
Okres 4	9,89	-3,93	
Okres 5	9,76	-5,11	
<b>Zmienna Beta - hipoksja</b>			
Trening	Wartości rzeczywiste [ $\mu$ V]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$ po wszystkich okresach
Okres 1	3,05	2,49	
Okres 2	3,22	8,11	
Okres 3	3,18	6,95	0,05
Okres 4	3,20	7,56	
Okres 5	3,18	6,96	

**Tabela 4** Przyrosty względne zmiennych Theta i Beta (średnie z okresów treningowych), jednopodstawowe i siła efektu po treningowego w grupie kontrolnej (GK), cykl III-IV

<b>III cykl pomiarowy</b>			
<b>Zmienna Theta - normoksja</b>			
Trening	Wartości rzeczywiste [ $\mu\text{V}$ ]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$ po wszystkich okresach
Okres 1	9,00	1,60	
Okres 2	9,07	2,43	
Okres 3	9,29	4,86	0,02
Okres 4	9,18	3,69	
Okres 5	9,05	2,16	
<b>Zmienna Beta - normoksja</b>			
Trening	Wartości rzeczywiste [ $\mu\text{V}$ ]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$ po wszystkich okresach
Okres 1	2,90	3,88	
Okres 2	3,16	13,07	
Okres 3	3,36	20,17	0,28
Okres 4	3,48	24,66	
Okres 5	3,56	27,54	
<b>IV cykl pomiarowy</b>			
<b>Zmienna Theta - hipoksja</b>			
Trening	Wartości rzeczywiste [ $\mu\text{V}$ ]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$ po wszystkich okresach
Okres 1	9,60	(-)1,05	
Okres 2	9,30	(-)4,09	
Okres 3	9,67	(-)0,25	0,03
Okres 4	9,45	(-)2,54	
Okres 5	9,86	1,63	
<b>Zmienna Beta - hipoksja</b>			
Trening	Wartości rzeczywiste [ $\mu\text{V}$ ]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$ po wszystkich okresach
Okres 1	3,50	-1,16	
Okres 2	3,36	-5,12	
Okres 3	3,00	-15,27	0,07
Okres 4	3,08	-12,98	
Okres 5	3,42	-3,18	

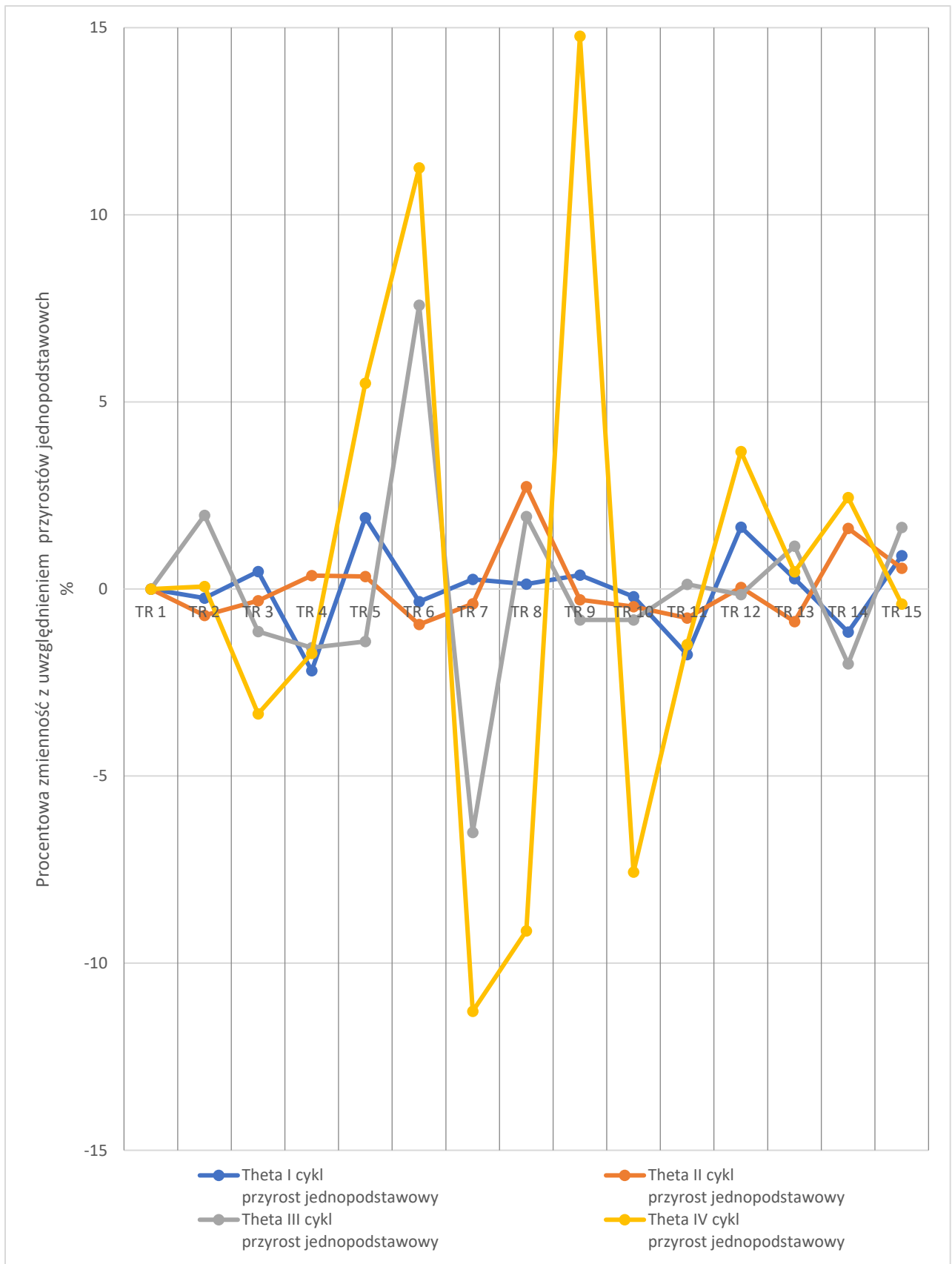
Jak wykazały analizy w I cyklu pomiarowym dla zmiennej Theta z uwzględnieniem przyrostów względnych w grupie badanej wykazano trend spadkowy i jej wartość obniżyła się o 3,77%. Natomiast dla zmiennej Beta wykazano trend wzrostowy osiągając 7,61% przyrostu wartości pod koniec cyklu (Tabela 11).

W II cyklu pomiarowym dla zmiennej Theta z uwzględnieniem przyrostów względnych w grupie badanej wykazano trend spadkowy i jej wartość obniżyła się o 5,11%. Dla zmiennej

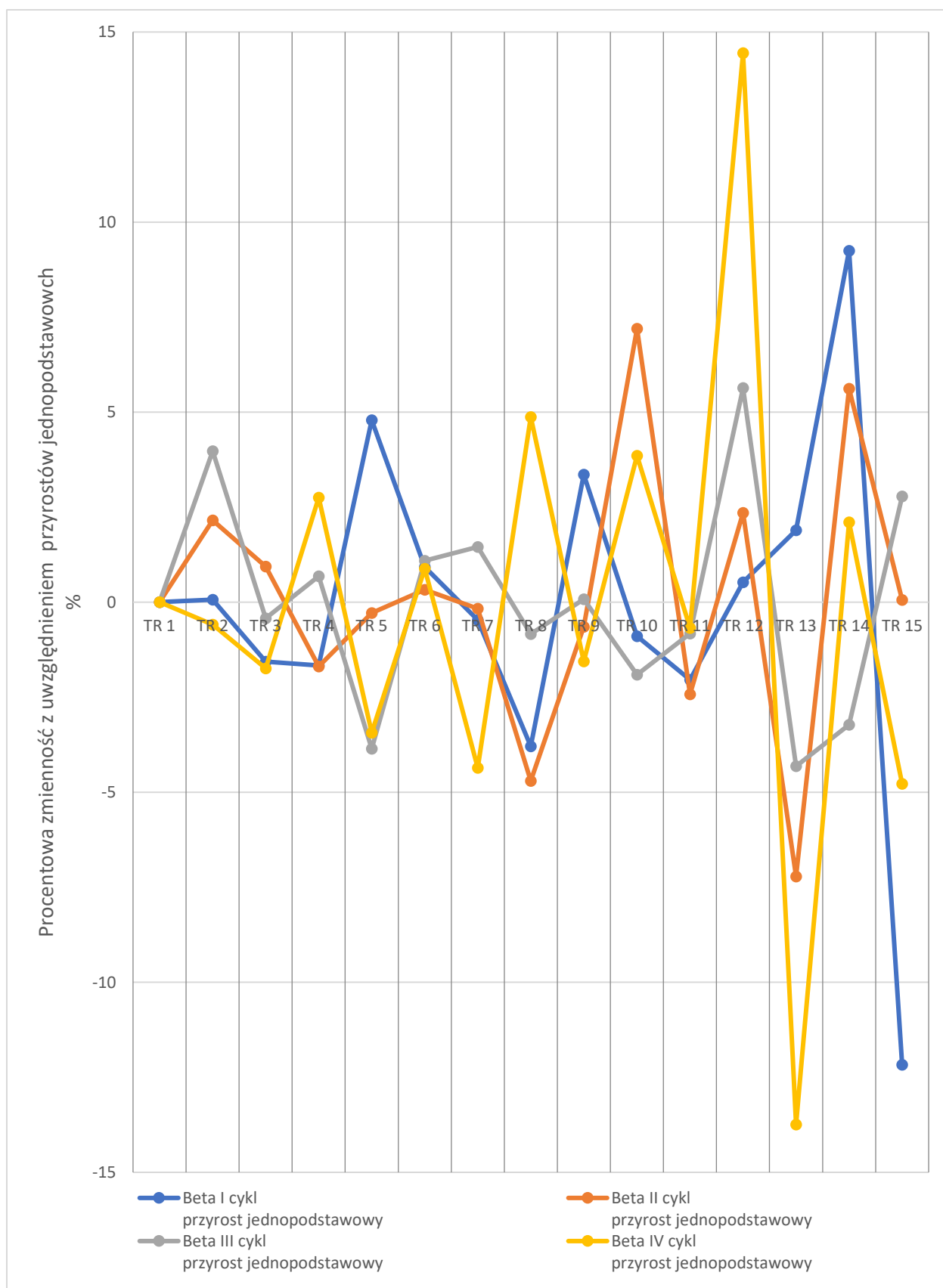
Beta wykazano trend wzrostowy osiągając 6,96% przyrostu wartości pod koniec cyklu (Tabela 11).

Jak wykazały analizy statystyczne, w III cyklu pomiarowym dla zmiennej Theta z uwzględnieniem przyrostów względnych w grupie badanej wykazano trend wzrostowy i jej wartość podwyższyła się o 2,16%. Natomiast dla zmiennej Beta wykazano trend wzrostowy osiągając 27,54% przyrostu wartości pod koniec cyklu (Tabela 12).

W IV cyklu pomiarowym dla zmiennej Theta z uwzględnieniem przyrostów względnych w grupie badanej wykazano trend wzrostowy i jej wartość podwyższyła się o 1,63%. Dla zmiennej Beta wykazano trend spadkowy osiągając 3,18% spadku wartości pod koniec cyklu (Tabela 12).



**Ryc. 4** Szczegółowy rozkład zmienności fal Theta po poszczególnych treningach biofeedback w kolejnych cyklach treningowych- wartości przyrostów względnych jednopodstawowych (procent zmian) – GK.



**Ryc. 5** Szczegółowy rozkład zmienności fal Beta po poszczególnych treningach biofeedback w kolejnych cyklach treningowych- wartości przyrostów względnych jednopodstawowych (procent zmian) – GK.

#### 4.2 Analiza różnic w wartościach amplitudy fal Theta i Beta uzyskanych po treningach biofeedback w normoksji i hipoksji normobarycznej, w grupie badanej i kontrolnej (wewnątrzgrupowe i międzygrupowe)

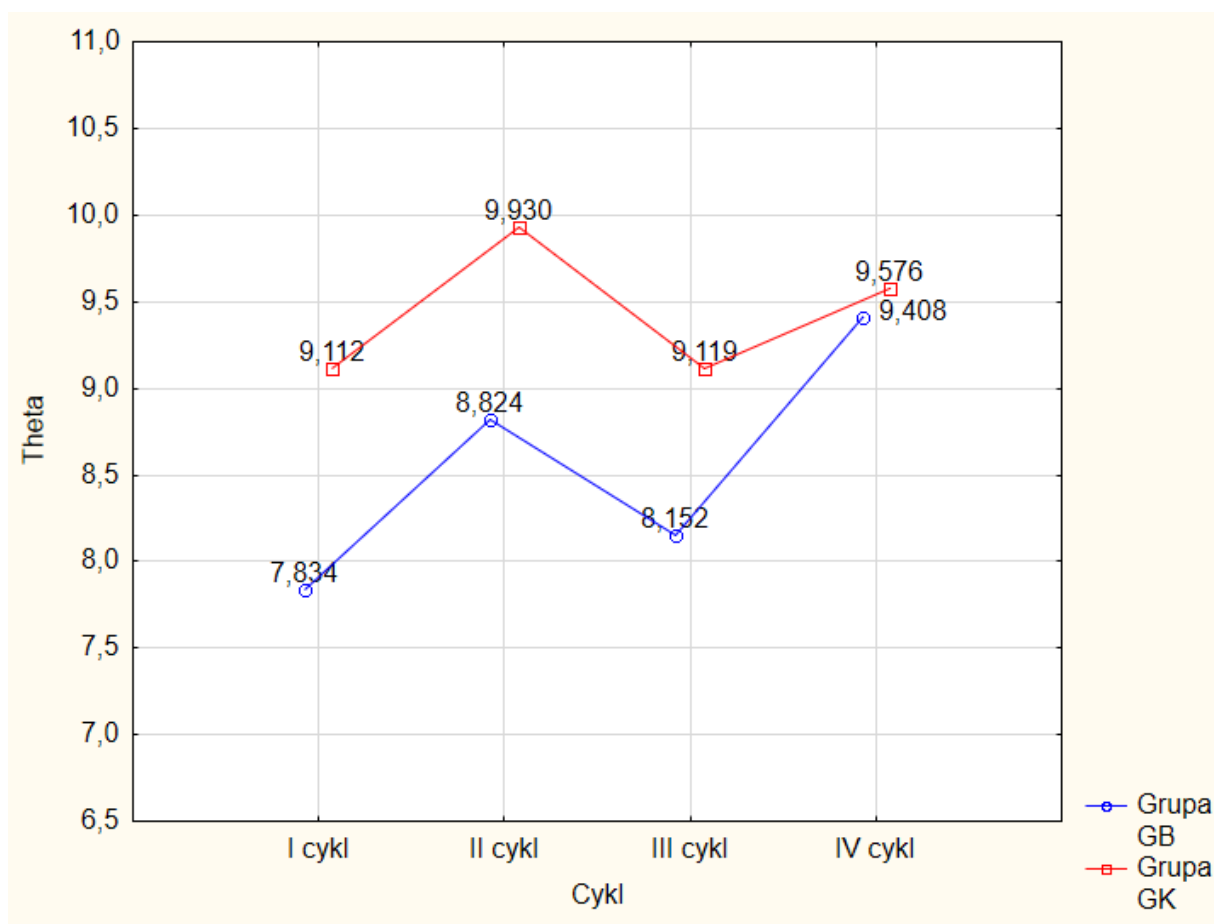
Analiza wariancji z powtarzanymi pomiarami ANOVA wykazała istotne różnice w wartościach fal Theta ( $F=118$ ;  $p=0.001$ ) i Beta ( $F=123$ ;  $p=0.001$ ), w aspekcie cykli i grup pomiarowych. Wykonano zatem testy post-hock w celu zbadania dokładnych różnic wewnątrzgrupowych i międzygrupowych.

Charakterystyka różnic wewnątrzgrupowych i międzygrupowych wykazanych w testach post-hock, przedstawiona została w tabelach 13 i 14 oraz rycinach 7 i 8, osobno dla amplitudy fal theta i beta.

**Tabela 5** Charakterystyka różnic wewnątrzgrupowych i międzygrupowych fal Theta w aspekcie poszczególnych cykli treningowych (wartości istotności p)

Różnice wewnątrzgrupowe i międzygrupowe fal Theta									
Cykl	Grupa	I cykl	I cykl	II cykl	II cykl	III cykl	III cykl	IV cykl	IV cykl
I cykl	GB		0,049	0,281	0,001	0,995	0,039	0,008	0,002
I cykl	GK	0,049		0,997	0,528	0,319	1,000	0,997	0,955
II cykl	GB	0,281	0,997		0,162	0,753	0,997	0,862	0,633
II cykl	GK	0,001	0,528	0,162		0,002	0,539	0,919	0,990
III cykl	GB	0,995	0,319	0,753	0,002		0,310	0,070	0,023
III cykl	GK	0,039	1,000	0,997	0,539	0,310		0,997	0,958
IV cykl	GB	0,008	0,997	0,862	0,919	0,070	0,997		1,000
IV cykl	GK	0,002	0,955	0,633	0,990	0,023	0,958	1,000	

Analiza różnic między cyklowych amplitudy fal Theta w grupie badanej, z uwzględnieniem poszczególnych cykli, wykazała, iż zaszły istotne statystycznie zmiany w wartościach amplitudy fal Theta pomiędzy I a IV cyklem oraz IV i I cyklem. Dodatkowo zaobserwowano istotne różnice międzygrupowe (GB vs. GK) w wartościach amplitudy Theta, pomiędzy I i I cyklem, I i II cyklem, I i III cyklem, I i IV cyklem, II i I cyklem, III a II cyklem, III, a IV cyklem, III i I cyklem, IV i I oraz VI i III cyklem. W grupie kontrolnej nie zauważono istotnych różnic między cyklami w zmianie wartości amplitudy Theta ani w warunkach normoksji, ani w warunkach hipoksji.

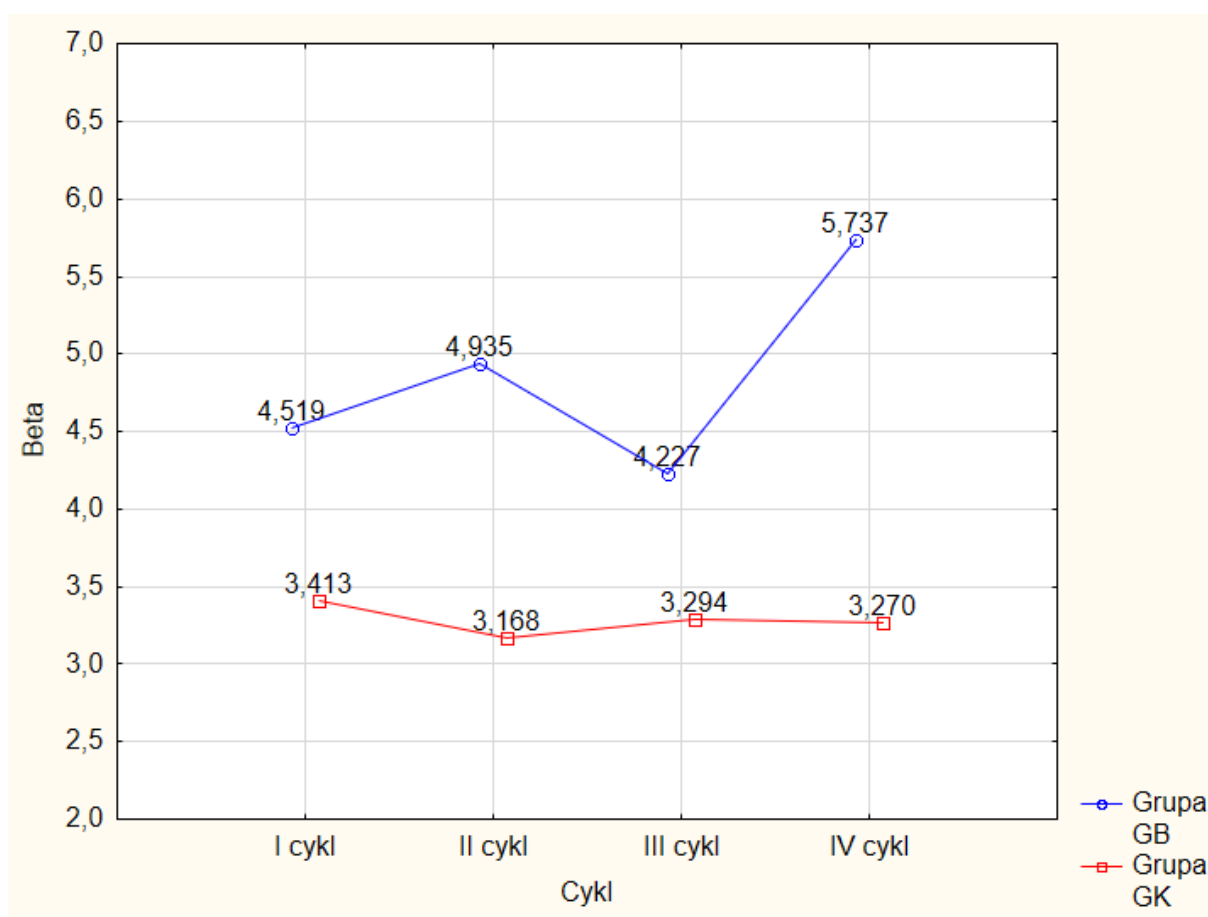


**Ryc. 6** Różnice w wartościach amplitudy fal Theta z uwzględnieniem poszczególnych cykli treningowych [ $\mu\text{V}$ ]

**Tabela 6** Charakterystyka różnic wewnątrzgrupowych i międzygrupowych fal Beta w aspekcie poszczególnych cykli treningowych (wartości istotności p)

Różnice wewnątrzgrupowe i międzygrupowe fal Beta									
Cykl	Grupa	I cykl	I cykl	II cykl	II cykl	III cykl	III cykl	IV cykl	IV cykl
I cykl	GB		0,101	0,963	<b>0,018</b>	0,995	<b>0,046</b>	<b>0,049</b>	<b>0,039</b>
I cykl	GK	0,101		<b>0,005</b>	0,998	0,435	1,000	<b>0,000</b>	1,000
II cykl	GB	0,963	<b>0,005</b>		<b>0,001</b>	0,613	<b>0,002</b>	0,454	<b>0,001</b>
II cykl	GK	<b>0,018</b>	0,998	<b>0,001</b>		0,134	1,000	<b>0,001</b>	1,000
III cykl	GB	0,995	0,435	0,613	0,134		0,261	<b>0,005</b>	0,232
III cykl	GK	<b>0,046</b>	1,000	<b>0,002</b>	1,000	0,261		<b>0,001</b>	1,000
IV cykl	GB	<b>0,049</b>	<b>0,000</b>	0,454	<b>0,001</b>	<b>0,005</b>	<b>0,001</b>		<b>0,001</b>
IV cykl	GK	<b>0,039</b>	1,000	<b>0,001</b>	1,000	0,232	1,000	<b>0,001</b>	

Analiza różnic między cyklowych amplitudy fal Beta w grupie badanej, z uwzględnieniem poszczególnych cykli, wykazała, iż zaszły istotne statystycznie zmiany w wartościach amplitudy fal Beta pomiędzy I a IV cyklem, III a IV cyklem, IV a I cyklem oraz IV i III cyklem. Dodatkowo zaobserwowano istotne różnice międzygrupowe (GB vs. GK) w wartościach amplitudy fal Beta, pomiędzy I i II cyklem, I i III cyklem, I i IV cyklem, II i I cyklem, II i II cyklem, II i III cyklem, II i IV cyklem, III i I cyklem, III i II cyklem, III i IV cyklem, IV i II cyklem, IV i III cyklem oraz VI i VI cyklem. W grupie kontrolnej nie zauważono istotnych różnic między cyklami w zmianie wartości amplitudy fal Beta ani w warunkach normoksji, ani w warunkach hipoksji.



**Ryc. 7** Różnice w wartościach amplitudy fal Beta z uwzględnieniem poszczególnych cykli treningowych [ $\mu\text{V}$ ]



### 4.3 Analiza dynamiki zmienności wartości czasu reakcji prostej i złożonej przed i po treningach biofeedback w testach wiedeńskich

**Tabela 7** Przyrosty względne zmiennych czas reakcji prostej, jednopodstawowe i siła efektu  $\eta^2$  w grupie badanej (GB), cykl I-IV

<b>I cykl pomiarowy</b>			
<b>Zmienna - czas reakcji prostej</b>			
Pomiar	Wartości rzeczywiste [s]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$
Przed cyklem	0,224	0	0,18
Po cyklu	0,223	-5,380	
<b>II cykl pomiarowy</b>			
<b>Zmienna - czas reakcji prostej</b>			
Pomiar	Wartości rzeczywiste [s]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$
Przed cyklem	0,225	0	0,10
Po cyklu	0,232	3,354	
<b>III cykl pomiarowy</b>			
<b>Zmienna - czas reakcji prostej</b>			
Pomiar	Wartości rzeczywiste [s]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$
Przed cyklem	0,224	0	0,08
Po cyklu	0,219	-2,009	
<b>IV cykl pomiarowy</b>			
<b>Zmienna - czas reakcji prostej</b>			
Pomiar	Wartości rzeczywiste [s]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$
Przed cyklem	0,224	0	0,16
Po cyklu	0,234	4,089	

Wartości przyrostów względnych testów wiedeńskich czasu reakcji prostej w aspekcie indeksów jednopodstawowych i łańcuchowych przedstawione zostały w tabelach od 15 do 16 (Tabela 15 dla GB oraz tabela 16 dla GK), osobno dla grupy badanej (GB), jak i kontrolnej (GK).

**Tabela 8** Przyrosty względne zmiennych czasu reakcji prostej, jednopodstawowe i siła efektu  $\eta^2$  w grupie kontrolnej (GK), cykl I-IV

<b>I cykl pomiarowy</b>			
<b>Zmienna - czas reakcji prostej</b>			
Pomiar	Wartości rzeczywiste [s]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$
Przed cyklem	0,226	0	0,04
Po cyklu	0,224	-0,701	
<b>II cykl pomiarowy</b>			
<b>Zmienna - czas reakcji prostej</b>			
Pomiar	Wartości rzeczywiste [s]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$
Przed cyklem	0,227	0	0,04
Po cyklu	0,225	-0,874	
<b>III cykl pomiarowy</b>			
<b>Zmienna - czas reakcji prostej</b>			
Pomiar	Wartości rzeczywiste [s]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$
Przed cyklem	0,227	0	0,03
Po cyklu	0,226	-0,554	
<b>IV cykl pomiarowy</b>			
<b>Zmienna - czas reakcji prostej</b>			
Pomiar	Wartości rzeczywiste [s]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$
Przed cyklem	0,227	0	0,01
Po cyklu	0,227	-0,188	

Charakterystyka uzyskiwanych wartości przyrostów względnych wartości testów wiedeńskich czasu reakcji złożonej w aspekcie indeksów jednopodstawowych i łańcuchowych przedstawiona została w tabelach od 17 do 18 (Tabela 17 dla GB oraz tabela 18 dla GK), osobno dla grupy badanej (GB), jak i kontrolnej (GK).

**Tabela 9** Przyrosty względne zmiennych czas reakcji złożonej, jednopodstawowe i siła efektu  $\eta^2$  w grupie badanej (GB), cykl I-IV

<b>I cykl pomiarowy</b>			
<b>Zmienna - czas reakcji złożonej</b>			
Pomiar	Wartości rzeczywiste [s]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$
Przed cyklem	0,354	0	0,06
Po cyklu	0,346	-2,251	
<b>II cykl pomiarowy</b>			
<b>Zmienna - czas reakcji złożonej</b>			
Pomiar	Wartości rzeczywiste [s]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$
Przed cyklem	0,354	0	0,08
Po cyklu	0,364	2,884	
<b>III cykl pomiarowy</b>			
<b>Zmienna - czas reakcji złożonej</b>			
Pomiar	Wartości rzeczywiste [s]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$
Przed cyklem	0,354	0	0,02
Po cyklu	0,353	-0,186	
<b>IV cykl pomiarowy</b>			
<b>Zmienna - czas reakcji złożonej</b>			
Pomiar	Wartości rzeczywiste [s]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$
Przed cyklem	0,354	0	0,08
Po cyklu	0,364	2,884	

Uzyskiwane wartości przyrostów względnych wartości testów wiedeńskich czasu reakcji złożonej w aspekcie indeksów jednopodstawowych i łańcuchowych przedstawiona została w tabelach od 17 do 18 (Tabela 17 dla GB oraz tabela 18 dla GK), osobno dla grupy badanej (GB), jak i kontrolnej (GK).

**Tabela 10** Przyrosty względne zmiennych czasu reakcji złożonej, jednopodstawowe i siła efektu  $\eta^2$  w grupie kontrolnej (GK), cykl I-IV

<b>I cykl pomiarowy</b>			
<b>Zmienna - czas reakcji złożonej</b>			
Pomiar	Wartości rzeczywiste [s]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$
Przed cyklem	0,357	0	0,02
Po cyklu	0,356	-0,343	
<b>II cykl pomiarowy</b>			
<b>Zmienna - czas reakcji złożonej</b>			
Pomiar	Wartości rzeczywiste [s]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$
Przed cyklem	0,356	0	0,01
Po cyklu	0,356	-0,182	
<b>III cykl pomiarowy</b>			
<b>Zmienna - czas reakcji złożonej</b>			
Pomiar	Wartości rzeczywiste [s]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$
Przed cyklem	0,357	0	0,02
Po cyklu	0,356	-0,343	
<b>IV cykl pomiarowy</b>			
<b>Zmienna - czas reakcji złożonej</b>			
Pomiar	Wartości rzeczywiste [s]	Przyrosty jednopodstawowe [% wzrostu lub spadku]	$\eta^2$
Przed cyklem	0,355	0	0,09
Po cyklu	0,369	3,900	

#### **4.4 Analiza różnic w czasów reakcji prostej i złożonej przed i po treningach biofeedback, w grupie badanej i kontrolnej (między cyklowe) w testach wiedeńskich**

Analiza wariancji z powtarzаныmi pomiarami wykazała ANOVA wykazała istotne różnice w wartościach reakcji prostej i złożonej, w aspekcie pomiarów po cyklach oraz grup pomiarowych (reakcja prosta  $F=6.01$ ;  $p=0.001$ ; reakcja złożona  $F=11.91$ ;  $p=0.001$ ). Wykonano zatem testy post-hock.

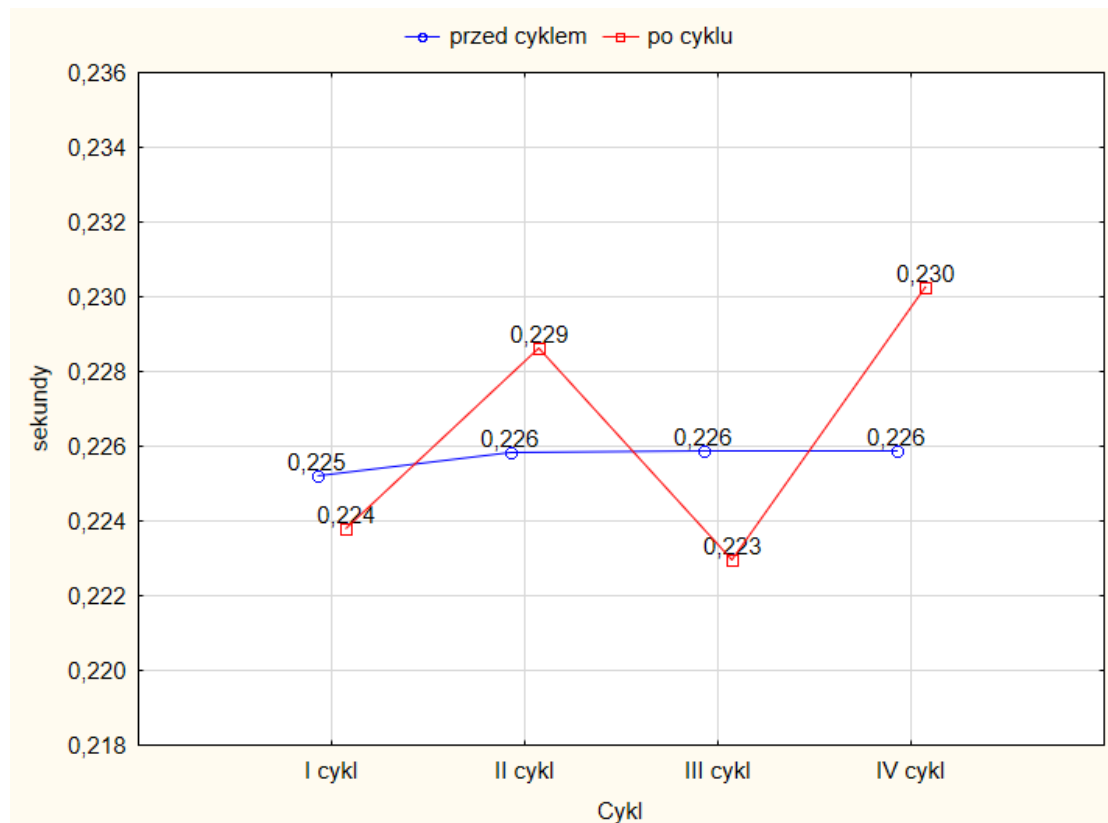
Różnice testów wiedeńskich czasu reakcji prostej i złożonej przed i po treningach biofeedback, pomiędzy cyklami, przedstawiona została w tabelach 19-20 oraz rycinach 9-10.

**Tabela 11** Charakterystyka różnic pomiędzy cyklami w czasie reakcji prostej

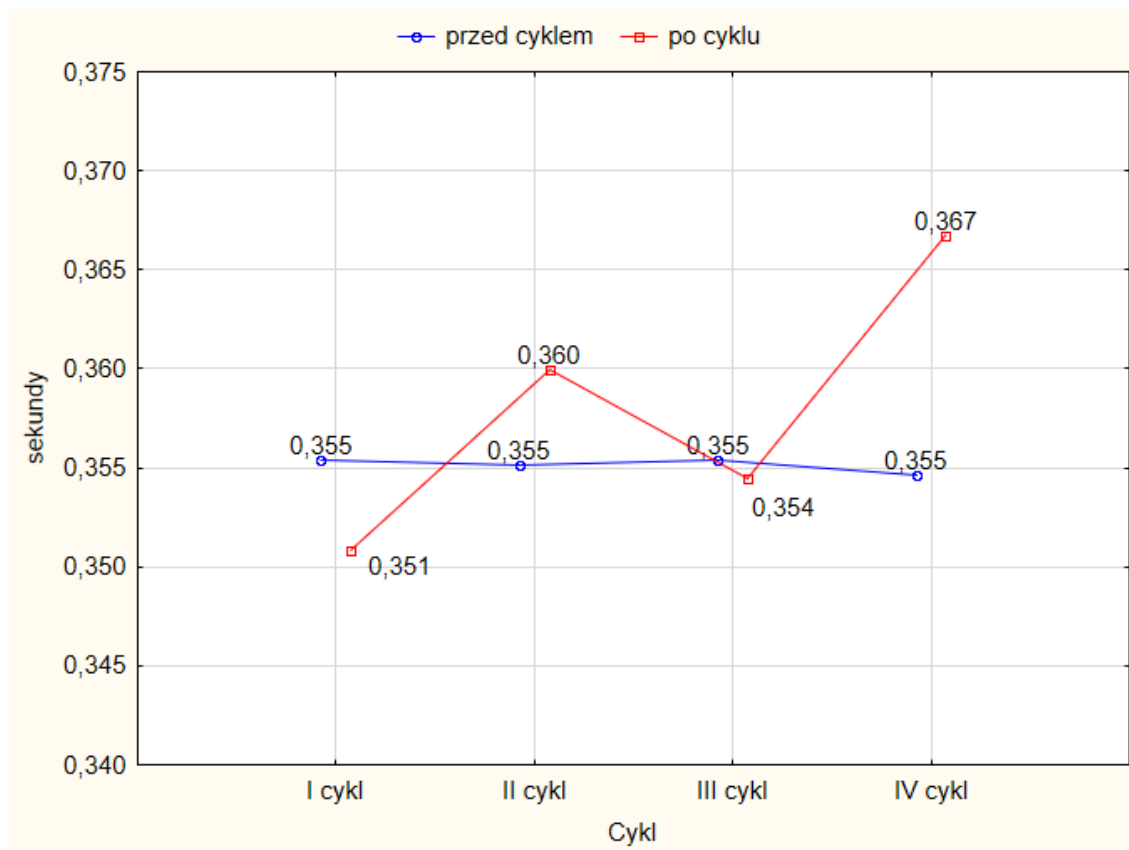
Reakcja prosta - zmienna przed cyklem									
Cykl	Grupa	I cykl	I cykl	II cykl	II cykl	III cykl	III cykl	IV cykl	IV cykl
I cykl	GB		1,000	1,000	0,986	1,000	0,984	1,000	0,984
I cykl	GK	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
II cykl	GB	1,000	1,000		0,988	1,000	0,985	1,000	0,985
II cykl	GK	0,986	1,000	0,988		0,986	1,000	0,988	1,000
III cykl	GB	1,000	1,000	1,000	0,986		0,984	1,000	0,984
III cykl	GK	0,984	1,000	0,985	1,000	0,984		0,985	1,000
IV cykl	GB	1,000	1,000	1,000	0,988	1,000	0,985		0,985
IV cykl	GK	0,984	1,000	0,985	1,000	0,984	1,000	0,985	
Reakcja prosta - zmienna po cyklu									
Cykl	Grupa	I cykl	I cykl	II cykl	II cykl	III cykl	III cykl	IV cykl	IV cykl
I cykl	GB		1,000	0,059	0,997	0,945	0,979	0,011	0,914
I cykl	GK	1,000		0,149	1,000	0,790	0,999	0,035	0,988
II cykl	GB	0,059	0,149		0,273	0,002	0,434	0,999	0,626
II cykl	GK	0,997	1,000	0,273		0,605	1,000	0,078	0,999
III cykl	GB	0,945	0,790	0,002	0,605		0,420	0,000	0,257
III cykl	GK	0,979	0,999	0,434	1,000	0,420		0,151	1,000
IV cykl	GB	0,011	0,035	0,999	0,078	0,000	0,151		0,271
IV cykl	GK	0,914	0,988	0,626	0,999	0,257	1,000	0,271	

**Tabela 12** Charakterystyka różnic pomiędzy cyklami w czasie reakcji złożonej

Reakcja złożona - zmienna przed cyklem									
Cykl	Grupa	I cykl	I cykl	II cykl	II cykl	III cykl	III cykl	IV cykl	IV cykl
I cykl	GB		0,997	1,000	0,999	1,000	0,997	1,000	1,000
I cykl	GK	0,997		0,997	1,000	0,997	1,000	0,997	1,000
II cykl	GB	1,000	0,997		0,999	1,000	0,997	1,000	1,000
II cykl	GK	0,999	1,000	0,999		0,999	1,000	0,999	1,000
III cykl	GB	1,000	0,997	1,000	0,999		0,997	1,000	1,000
III cykl	GK	0,997	1,000	0,997	1,000	0,997		0,997	1,000
IV cykl	GB	1,000	0,997	1,000	0,999	1,000	0,997		1,000
IV cykl	GK	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
Reakcja złożona - zmienna po cyklu									
Cykl	Grupa	I cykl	I cykl	II cykl	II cykl	III cykl	III cykl	IV cykl	IV cykl
I cykl	GB		0,418	0,003	0,418	0,748	0,418	0,003	0,001
I cykl	GK	0,418		0,571	1,000	1,000	1,000	0,571	0,071
II cykl	GB	0,003	0,571		0,571	0,264	0,571	1,000	0,956
II cykl	GK	0,418	1,000	0,571		1,000	1,000	0,571	0,071
III cykl	GB	0,748	1,000	0,264	1,000		1,000	0,264	0,017
III cykl	GK	0,418	1,000	0,571	1,000	1,000		0,571	0,071
IV cykl	GB	0,003	0,571	1,000	0,571	0,264	0,571		0,956
IV cykl	GK	0,001	0,071	0,956	0,071	0,017	0,071	0,956	



**Ryc. 8** Różnice w wartościach czasu reakcji prostej po cyklu, cykl I-IV



**Ryc. 9** Różnice w wartościach czasu reakcji złożonej po cyklu, cykl I-IV

Analiza różnic między cyklami czasów reakcji prostej po treningach biofeedback, w grupie badanej, z uwzględnieniem poszczególnych cykli, w testach wiedeńskich wykazała, iż zaszły istotne statystycznie zmiany po treningach biofeedback pomiędzy IV a I cyklem; II a III oraz III a IV. Dodatkowo zaobserwowano istotne różnice międzygrupowe (GB vs. GK) po treningach biofeedback, pomiędzy I a IV cyklem. W grupie kontrolnej nie zauważono istotnych różnic między cyklami w zmianie czasów reakcji prostej ani przed, ani po treningach biofeedback.

Natomiast analiza różnic między cyklami w aspekcie czasów reakcji złożonej po treningach biofeedback, w grupie badanej, w testach wiedeńskich wykazała, iż zaszły istotne statystycznie zmiany po treningach biofeedback pomiędzy I a II i IV cyklem;. Dodatkowo zaobserwowano istotne różnice międzygrupowe (GB vs. GK) po treningach biofeedback, pomiędzy I i III, a IV cyklem.

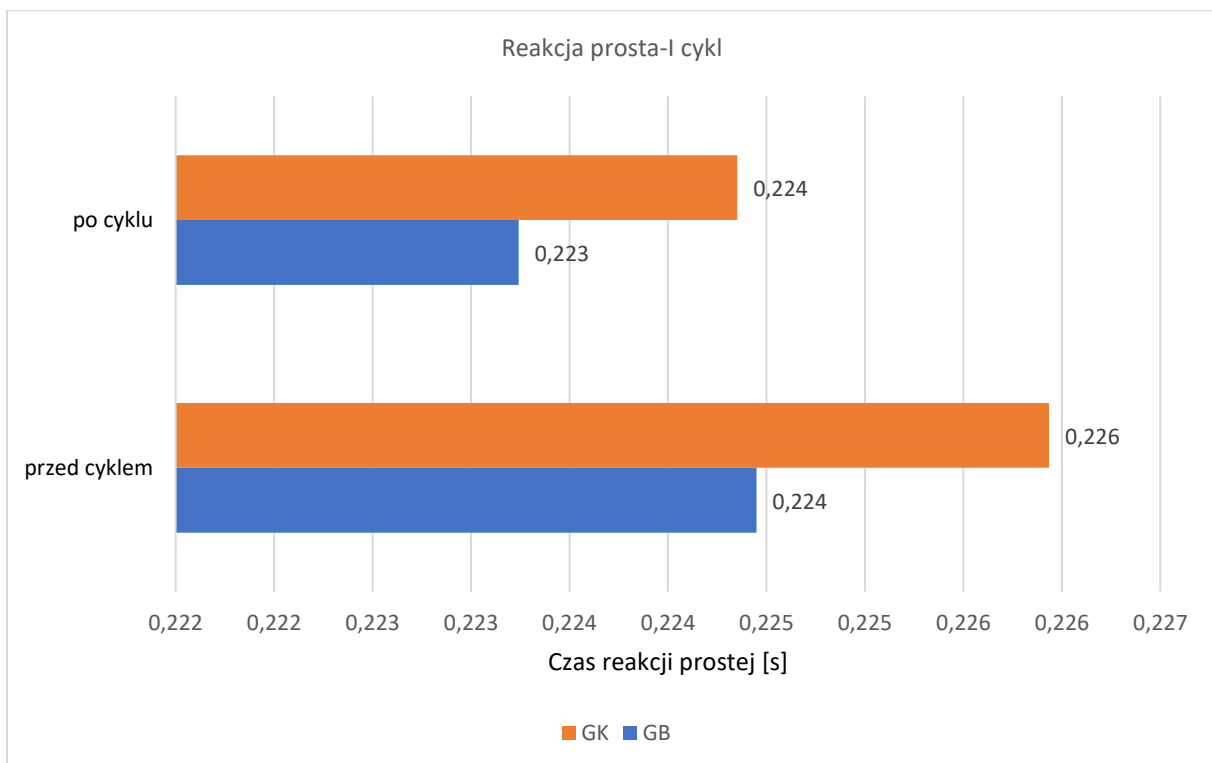
#### **4.5 Analiza porównawcza zmian wewnątrzgrupowych pod wpływem zastosowanych procedur treningu EEG biofeedback w warunkach normoksji i hipoksji normobarycznej, w poszczególnych cyklach treningowych**

Charakterystyki porównawcze zmian w reakcji prostej i złożonej pod wpływem zastosowanych procedur treningu EEG biofeedback w warunkach normoksji i hipoksji, w badanych grupach zawodników judo oraz analiza wariancji wewnątrzgrupowej, przedstawione zostały w tabelach 21-22 oraz rycinach 11-18.

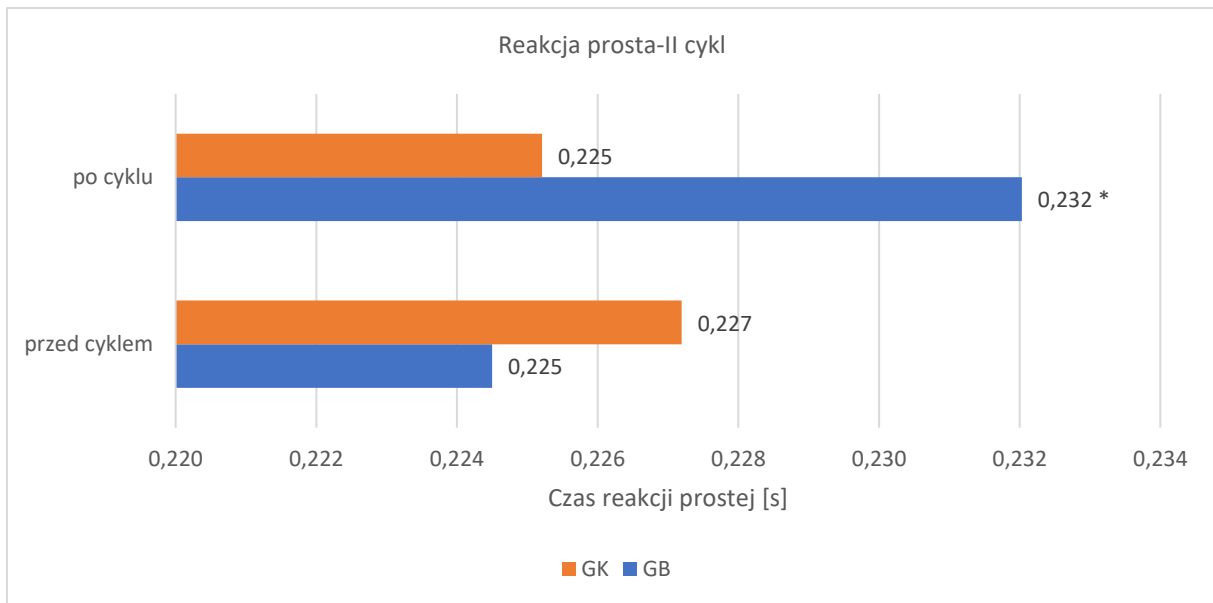


**Tabela 13** Charakterystyka różnic zmian (wartości rzeczywiste) w reakcji prostej pod wpływem zastosowanych procedur treningu EEG biofeedback w warunkach normoksji i hipoksji, w badanych grupach zawodników judo, w poszczególnych cyklach treningowych

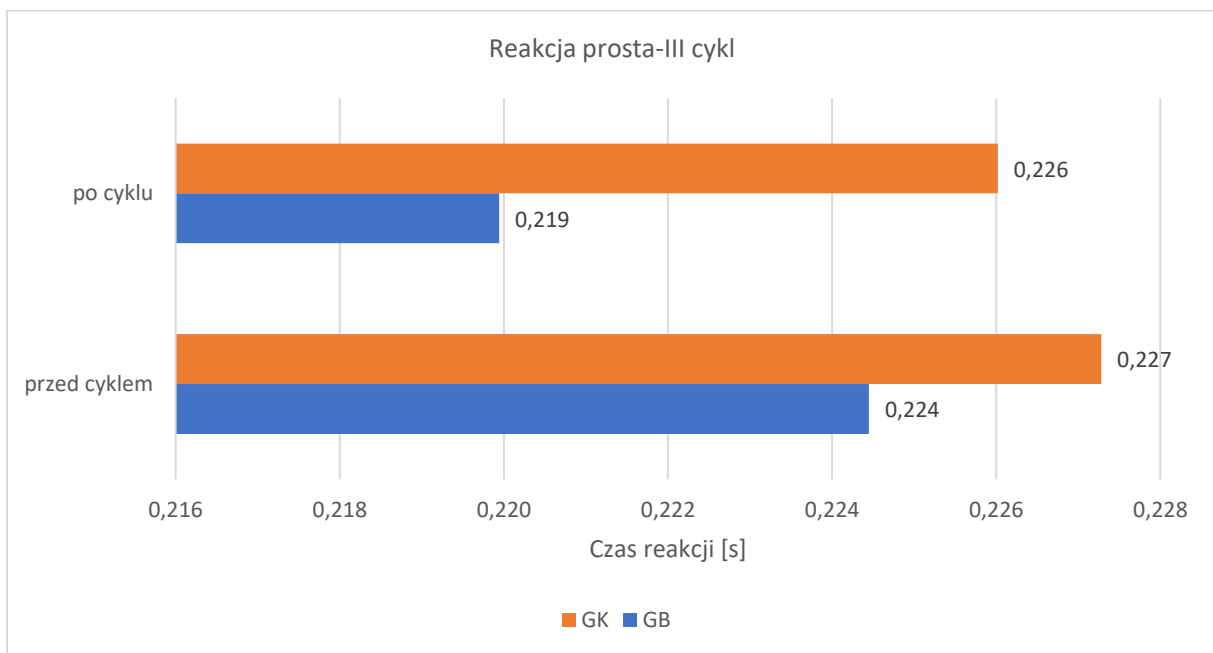
Wartości rzeczywiste-pomiarowe oraz istotność statystyczna								
GB	R Prosta-I cykl	p	R Prosta-II cykl	p	R Prosta-III cykl	p	R Prosta-IV cykl	p
przed cyklem	0,224	0,821	0,225	0,001	0,224	0,001	0,224	0,001
po cyklu	0,223		0,232		0,219		0,234	
Przyrosty względne - wartości modułowe								
Wartości rzeczywiste-pomiarowe oraz istotność statystyczna								
GK	R Prosta-I cykl	p	R Prosta-II cykl	p	R Prosta-III cykl	p	R Prosta-IV cykl	p
przed cyklem	0,226	0,721	0,227	0,872	0,227	0,703	0,227	0,911
po cyklu	0,224		0,225		0,226		0,227	



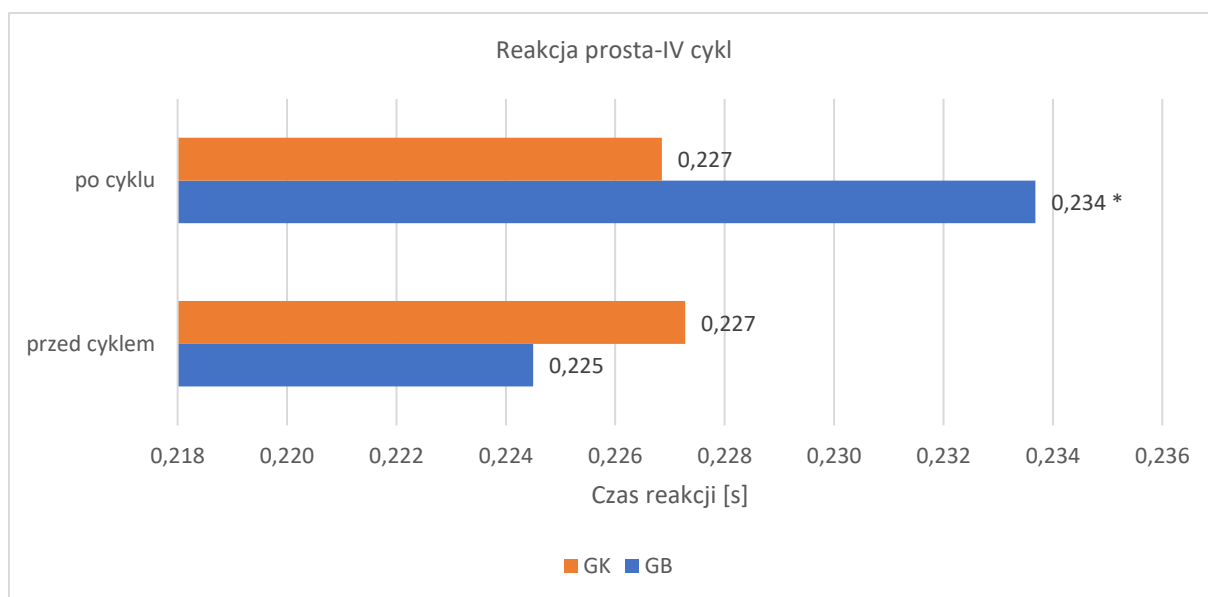
**Ryc. 10** Graficzna prezentacja zmian w reakcji prostej pod wpływem zastosowanych procedur treningu EEG biofeedback w warunkach normoksji, w badanych grupach zawodników judo – I cykl pomiarowy. \* - istotne zmiany



**Ryc. 11** Graficzna prezentacja zmian w reakcji prostej pod wpływem zastosowanych procedur treningu EEG biofeedback w warunkach hipoksji normobarycznej, w badanych grupach zawodników judo – II cykl pomiarowy. \* - istotne zmiany



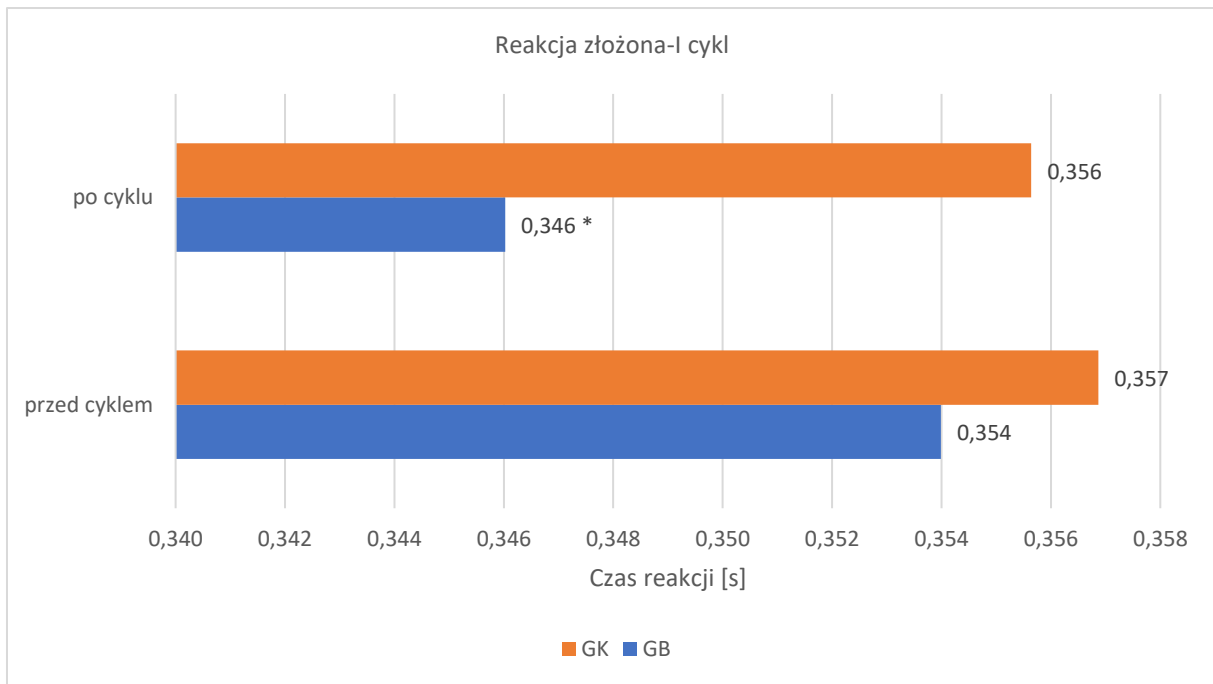
**Ryc. 12** Graficzna prezentacja zmian w reakcji prostej pod wpływem zastosowanych procedur treningu EEG biofeedback w warunkach normoksji, w badanych grupach zawodników judo – III cykl pomiarowy. \* - istotne zmiany



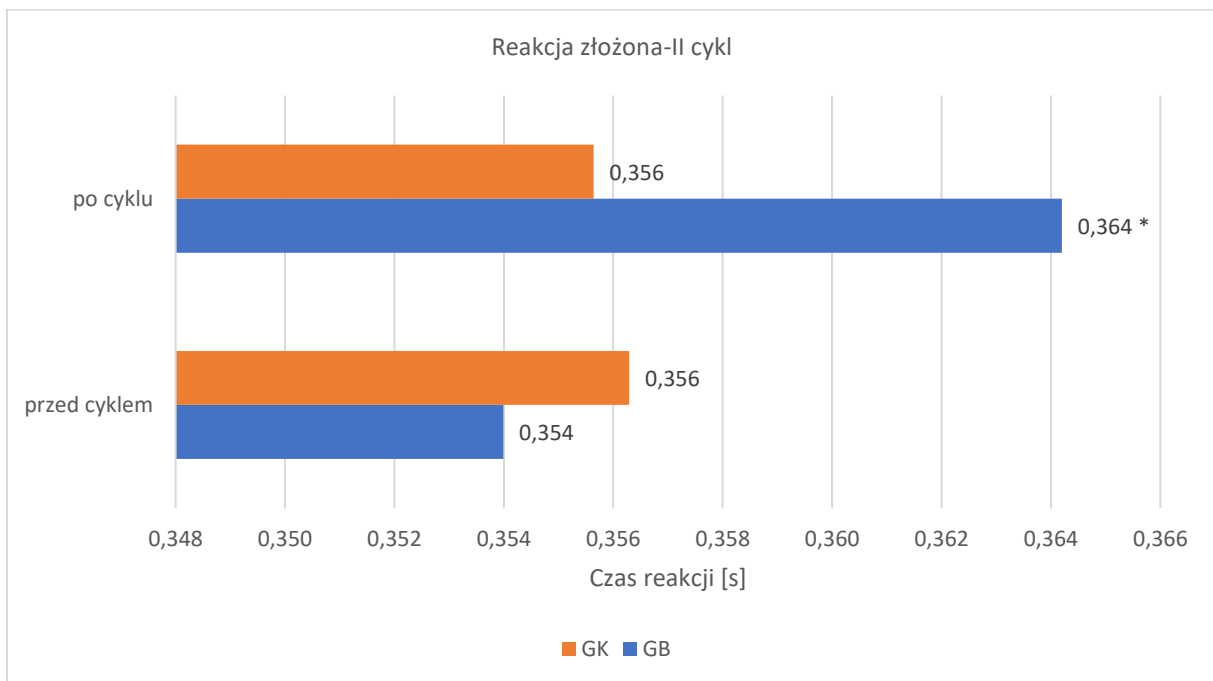
**Ryc. 13** Graficzna prezentacja zmian w reakcji prostej pod wpływem zastosowanych procedur treningu EEG biofeedback w warunkach hipoksji normobarycznej, w badanych grupach zawodników judo – IV cykl pomiarowy. \* - istotne zmiany

**Tabela 14** Charakterystyka różnic zmian (wartości rzeczywiste) w reakcji złożonej pod wpływem zastosowanych procedur treningu EEG biofeedback w warunkach normoksji i hipoksji, w badanych grupach zawodników judo, w poszczególnych cyklach treningowych

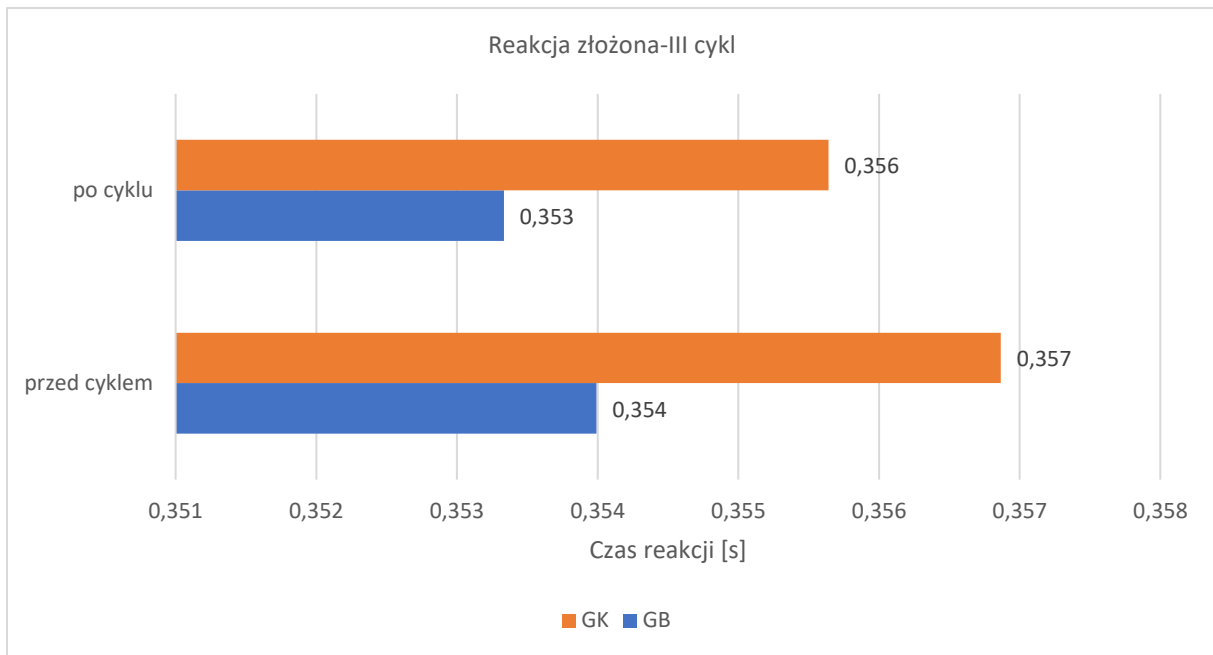
Wartości rzeczywiste-pomiarowe oraz istotność statystyczna								
GB	R Złożona -I cykl	p	R Złożona a-II cykl	p	R Złożona -III cykl	p	R Złożona -IV cykl	p
przed cyklem	0,354	0,017	0,354	0,001	0,354	0,317	0,354	0,001
po cyklu	0,346		0,364		0,353		0,364	
Wartości rzeczywiste-pomiarowe oraz istotność statystyczna								
GK	R Złożona -I cykl	p	R Złożona a-II cykl	p	R Złożona -III cykl	p	R Złożona -IV cykl	p
przed cyklem	0,357	0,911	0,356	0,999	0,357	0,887	0,355	0,811
po cyklu	0,356		0,356		0,355		0,369	



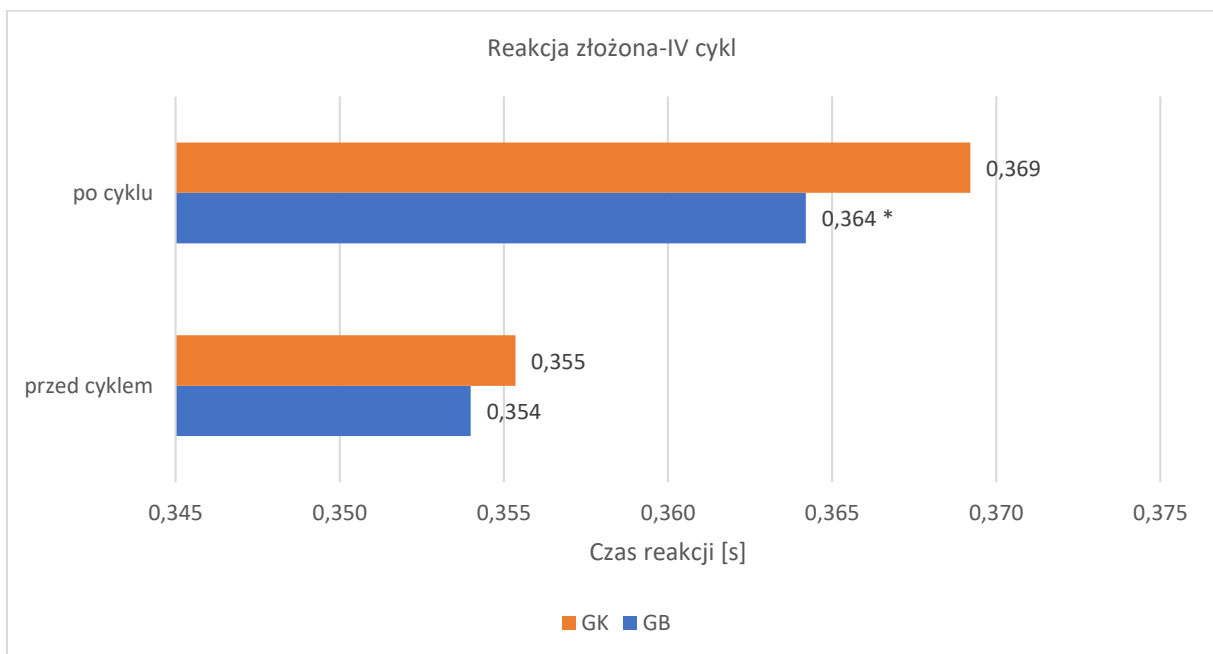
**Ryc. 14** Graficzna prezentacja zmian w reakcji złożonej pod wpływem zastosowanych procedur treningu EEG biofeedback w warunkach normoksji, w badanych grupach zawodników judo – I cykl pomiarowy. \* - istotne zmiany



**Ryc. 15** Graficzna prezentacja zmian w reakcji złożonej pod wpływem zastosowanych procedur treningu EEG biofeedback w warunkach hipoksji normobarycznej, w badanych grupach zawodników judo – II cykl pomiarowy. \* - istotne zmiany



**Ryc. 16** Graficzna prezentacja zmian w reakcji złożonej pod wpływem zastosowanych procedur treningu EEG biofeedback w warunkach normoksji, w badanych grupach zawodników judo – III cykl pomiarowy. \* - istotne zmiany



**Ryc. 17** Graficzna prezentacja zmian w reakcji złożonej pod wpływem zastosowanych procedur treningu EEG biofeedback w warunkach hipoksji normobarycznej, w badanych grupach zawodników judo – IV cykl pomiarowy. \* - istotne zmiany

## 5. Wnioski

Trening EEG-BF w kontekście optymalizacji procesu treningowego zawodników oraz doskonalenia ich wybranych cech motorycznych stanowi wciąż dziedzinę mało poznaną. Przeprowadzone badania własne dostarczyły wielu nowych informacji dotyczących wpływu treningu EEG biofeedback na czas reakcji prostej i złożonej u zawodników judo, oraz wpływu warunków hipoksji normobarycznej na dynamikę zmienności wartości amplitudy fal Theta i Beta. Stanowią dopełnienie dotychczasowych badań nad wpływem treningu EEG-BF na czas reakcji, jednocześnie uzupełniając ten aspekt w sferze treningu w warunkach hipoksji normobarycznej, który do tej pory był właściwie niezbadany. Uzyskane rezultaty wskazują, że zawodnicy z grupy badawczej w skutek realizacji protokołu theta/beta1 osiągnęli istotną statystycznie poprawę czasów reakcji złożonej po pierwszym cyklu treningowym w warunkach normoksji gdzie treningi wykonywane były co drugi dzień oraz istotną statystycznie poprawę czasów reakcji prostej po trzecim cyklu treningowym w warunkach normoksji gdzie treningi wykonywane były codziennie. Zaobserwowano pogorszenie czasu reakcji prostej i złożonej po zastosowaniu warunków hipoksji normobarycznej w badanych grupach zawodników. Nie zaobserwowano podobnych zmian w grupie kontrolnej. W oparciu o przedstawione wcześniej wyniki sformułowano następujące wnioski, potwierdzające sformułowane pytania i hipotezy badawcze:

1. Przyrosty względne dynamiki zmienności amplitudy fal Theta uzyskane podczas treningów EEG-BF w normoksji i hipoksji wykazały trend spadkowy, a wartości amplitudy fal Beta trend wzrostowy.
2. Największe przyrosty względne dynamiki zmienności wartości czasów reakcji prostej i złożonej w testach wiedzeńskich w warunkach normoksji zauważono od razu po treningu EEG-BF.
3. Przeprowadzone treningi EEG-BF w warunkach normoksji istotnie statystycznie wpłynęły na czas reakcji prostej i złożonej w badanych grupach zawodników judo.
4. Trening EEG-BF wykonywany w warunkach normoksji przeprowadzany codziennie istotnie wpływa na poprawę czasu reakcji prostej oraz trening EEG-BF wykonywany co drugi dzień wpływa istotnie statystycznie na poprawę czasu reakcji złożonej, natomiast trening w warunkach hipoksji normobarycznej nie wpłynął na poprawę czasu reakcji prostej i złożonej po wykonaniu treningów EEG-BF.

## 6. Bibliografia

1. Gevensleben H., Holl B., Albrecht B., Schlamp D., Kratz O., Studer P., Heinrich H. Neurofeedback training in children with ADHD: 6-month follow-up of a randomized controlled trial. *European Child and Adolescent Psychiatry*. 2010; 19: 715–724.
2. Girard O, Brocherie F, Millet G. Effects of altitude/hypoxia on single- and multiple-sprint performance: a comprehensive review. *Sports Medicine*. 2017; 47:1931-1949.
3. Hamlin M, Lizamore C, Hopkins W. The effect of natural or simulated altitude training on high-intensity intermittent running performance in team-sport athletes: a meta-analysis. *Sports Medicine*. 2018; 48(2):431-446.
4. Wolski L, McKenzie D, Wenger H. Altitude training for improvements in sea level performance: is there scientific evidence of benefit? *Sports Medicine*. 1996; 22:251-263.
5. Vogt M., Hoppeler H. Is hypoxia training good for muscles and exercise performance? *Progress in Cardiovascular Diseases*. 2010; 52(6): 525-533.
6. Klimesch W. EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain Research Review*. 1999; 29: 169–195.
7. Klimesch W. Memory processes, brain oscillations and EEG synchronization. *International Journal of Psychophysiology*. 1996; 24: 61–100.
8. Staufenbiel S. M., Brouwer A. -M., Keizer A. W., van Wouwe N. C. Effect of beta and gamma neurofeedback on memory and intelligence in the elderly. *Biological Psychology*. 2013; 95: 74–85.
9. Jurewicz K., Paluch K., Kublik E., Rogala J., Mikicin M., Wróbel A. EEG-neurofeedback training of beta band (12–22Hz) effects alpha and beta frequencies – A controlled study of a healthy population. *Neuropsychologia*. 2018; 108: 13-24.
10. Kamiński J., Brzezicka A., Gola M., Wróbel A. Beta band oscillations engagement in human alertness process. *International Journal of Psychophysiology*. 2012; 85(1): 125 – 128.
11. Wróbel A. Attentional activation in corticothalamic loops of the visual system. In Chalupa L. M., Werner J. S. (Eds.), *New visual neurosciences* 2014; 339–350.
12. Wróbel A. Beta activity: A carrier for visual attention. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*. 2000; 60: 247–260.

13. Wojciszke B., Baryła W. Skale do pomiaru nastroju i sześciu emocji. *Czasopismo Psychologiczne*. 2004; 11(1): 31–47.
14. Snarska A. Statystyka, ekonometria, prognozowanie. *Wydawnictwo Placet*. Warszawa, 2005.
15. Sobczyk M. Statystyka. *Wydawnictwo Naukowe PWN*. Warszawa, 2002.
16. Pavlicek V., Schirlo C., Nebel A., Regard M., Koller E.A., Brugger P. Cognitive and emotional processing at high altitude. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*. 2005;76(1):28-33.
17. Buck A., Schirlo C., Jasinsky V., Weber B., Burger C., von Schulthess G. Changes of cerebral blood flow during short-term exposure to normobaric hypoxia. *Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism*. 1998; 18: 906–10
18. Taylor L., Watkins S.L., Marshall H., Dascombe B.J., Foster J. The Impact of Different Environmental Conditions on Cognitive Function: A Focused Review. *Frontiers in Physiology*. 2016; 6:372.
19. Otis S., Rossman M., Schneider P., Rush M., Ringelstein E. Relationship of cerebral blood flow regulation to acute mountain sickness. *Journal of Ultrasound Medicine*. 1989; 8: 143–148
20. Thompson M., Thompson L. The neurofeedback book: An introduction to basic concepts in applied psychophysiology. *Wheat Ridge, CO: Association for Applied Psychophysiology and Biofeedback*. 2003.
21. Jasper H. H. The ten – twenty electrode system of the International Federation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*. 1958; 10: 371 – 375.