

UNIWERSYTET KAZIMIERZA WIELKIEGO

KOLEGIUM II

WYDZIAŁ PSYCHOLOGII

Daria Kukuła

569

(nr albumu)

Neuropoznawcze efekty przezczaszkowej stymulacji prądem stałym (tDCS) u zdrowych osób w okresie wczesnej dorosłości

Praca doktorska napisana pod kierunkiem

dr hab. Moniki Wiłkość-Dębczyńskiej,
prof. uczelni

Promotor pomocniczy

dr Anna Rasmus

Bydgoszcz, 2023

Podziękowania

Na powstanie i ostateczny kształt mojej pracy doktorskiej miało wpływ wiele osób, którym chciałabym w tym miejscu podziękować.

Serdecznie dziękuję mojej promotor, dr hab. Monice Wiłkość-Dębczyńskiej, prof. uczelni oraz promotor pomocniczej, dr Annie Rasmus, za okazaną pomoc, cenne uwagi i sugestie, jak również za ogromne zaangażowanie, życzliwość, wyrozumiałość, wsparcie merytoryczne i duchowe, całą przekazaną wiedzę oraz niezliczone godziny konsultacji.

Chciałabym podziękować mojemu mentorowi prof. dr hab. Pawłowi Izdebskiemu, dzięki któremu rozwinęłam swoje zainteresowania badawcze i który otworzył mi drogę do pracy naukowej.

Dziękuję Dziekanowi Wydziału Psychologii, prof. dr hab. Januszowi Trempale, oraz wszystkim Pracownikom za cenne wykłady, współpracę, konsultacje i atmosferę Wydziału sprzyjającą rozwojowi.

Podziękowania składam mgr Katarzynie Wolszczak za możliwość współpracy i wprowadzenie w tematykę podejmowanej w pracy stymulacji prądem stałym, jak i za chęć dzielenia się wiedzą i doświadczeniem.

Dziękuję prof. dr hab. Romanowi Ossowskiemu i dr hab. Barbarze Ciżkowicz, prof. uczelni za cenne wskazówki udzielane w trakcie pisania pracy.

Podziękowania składam także Uczestnikom badania.

Słowa podziękowań i wdzięczności kieruję również do moich bliskich, którzy okazywali wsparcie i zrozumienie przez cały okres tworzenia niniejszej pracy.

Daria Kukuła

Spis treści

Wstęp.....	5
1. Teoretyczne podstawy badań.....	8
1.1. Neuropoznawcze aspekty funkcjonowania człowieka	8
1.1.1. Procesy poznawcze	8
1.1.2. Charakterystyka funkcjonowania poznawczego w toku życia.....	11
1.1.3. Charakterystyka wybranych procesów poznawczych.....	17
1.2. Przechczaszkowa stymulacja prądem stałym	24
1.2.1. Mechanizm działania.....	27
1.2.2. Obszary zastosowania	28
1.2.3. Metoda tDCS a plastyczność mózgu.....	32
1.3. Wpływ przechczaszkowej stymulacji prądem stałym na funkcjonowanie poznawcze u osób zdrowych.....	34
2. Metodologia badań własnych	48
2.1. Cel badań i jego uzasadnienie	48
2.2. Założenia teoretyczne i model badań	50
2.3. Charakterystyka narzędzi badawczych.....	55
2.4. Organizacja badań własnych	64
2.5. Charakterystyka osób badanych	68
2.6. Zastosowane procedury statystyczne.....	70
3. Wyniki.....	72
3.1. Statystyki opisowe.....	72
3.2. Wpływ stymulacji tDCS na funkcje wykonawcze (różnice w funkcjach wykonawczych w zależności od warunku badawczego).....	83
3.3. Związek pomiędzy wyjściowym poziomem funkcji wykonawczych a wielkością zmiany w zakresie tych funkcji po przebytej stymulacji tDCS.....	95

3.4.	Związek pomiędzy wielkością zmiany w pamięci operacyjnej a wielkością zmian w innych procesach funkcji wykonawczych po przebytej stymulacji tDCS.....	100
3.5.	Różnice międzypłciowe w zakresie różnic w funkcjach wykonawczych w zależności od grupy.....	109
4.	Dyskusja.....	114
4.1.	Wpływ stymulacji tDCS na funkcje wykonawcze	116
4.1.1.	tDCS a pamięć operacyjna	116
4.1.2.	tDCS a proces pobudzania.....	124
4.1.3.	tDCS a proces hamowania.....	126
4.1.4.	tDCS a proces kontroli działania	130
4.2.	Początkowy poziom funkcjonowania poznawczego a efektywność stymulacji	132
4.3.	Wielkość zmiany w pamięci operacyjnej a wielkość zmian w innych procesach funkcji wykonawczych	133
4.4.	Płeć a badane zmienne.....	134
4.5.	Ograniczenia badań własnych	135
4.6.	Implikacje praktyczne.....	137
5.	Wnioski.....	139
	Bibliografia.....	141
	Spis tabel	183
	Spis rysunków	185

Wstęp

Rozważania nad możliwością usprawniania funkcjonowania poznawczego osób w różnym wieku zyskują w ostatnich latach coraz większe zainteresowanie i są przedmiotem licznych badań. Wydłużanie się długości życia z jednej strony i wzrost tempa życia z drugiej skutkują coraz większą liczbą obowiązków stawianych ludziom w codziennym życiu. Ciągły rozwój technologii dotyka praktycznie wszystkich obszarów funkcjonowania. Niejako naturalną konsekwencją takiego stanu rzeczy stanowi wzrost zainteresowania metodami, które w sposób nieinwazyjny mogą poprawić funkcjonowanie poznawcze, także wśród osób zdrowych. w ostatnich 20 latach uwaga badaczy koncentruje się w coraz większej mierze na różnych formach nieinwazyjnych technik stymulacji mózgu (Habich i in., 2021; Zimmerman i Hummel, 2010). Jedną z takich metod jest przezczaszkowa stymulacja prądem stałym (*transcranial direct current stimulation*; tDCS). Stymulacja prądem stałym stanowi neuromodulacyjne, nieinwazyjne narzędzie stymulacji mózgu. w przeciwieństwie do innych nieinwazyjnych narzędzi stymulacji mózgu, takich jak przezczaszkowa stymulacja magnetyczna (*transcranial magnetic stimulation*; TMS), nie wywołuje ona bezpośrednio aktywności mózgu, tylko zmienia jego spontaniczną aktywność i pobudliwość poprzez podprogową modulację błon neuronalnych (Stagg i in., 2018; Woods i in., 2016).

Przezczaszkowa stymulacja prądem stałym jest wykorzystywana m.in. w chorobach neurologicznych i psychiatrycznych, w których funkcjonowanie poznawcze, takie jak pamięć, uwaga, procesy uczenia się, są zaburzone (Chen, 2022; Lefaucheur i in., 2017). Dotychczasowe badania wskazują skuteczność tej metody w szeroko pojętym usprawnianiu funkcji poznawczych. Uwagę zwraca fakt, iż zwykle doniesienia naukowe w tym obszarze skupiają się na jednokrotnym oddziaływaniu eksperymentalnym. Mechanizmem leżący u podstaw skuteczności tej metody jest prawdopodobnie neuroplastyczność. z samej definicji neuroplastyczności wynika, że wymaga ona działań powtarzalnych (Kuo i in., 2018; Samani i in., 2019; Venkatakrisnan i Sandrini, 2012). Trudno zatem wnioskować o skuteczności przezczaszkowej stymulacji prądem stałym jedynie na podstawie jednokrotnego oddziaływania. Ponadto do ograniczeń dotychczasowych badań w tym zakresie można zaliczyć m.in. małe grupy osób badanych. Zazwyczaj liczą one kilka, kilkanaście osób, które dodatkowo są zróżnicowane pod wieloma aspektami ważnymi z perspektywy badań naukowych, m.in. wiek, stan zdrowotny. Co więcej, prowadzone badania często różnią się również samym schematem stymulacji. Różnice te obejmują stymulowane obszary, czas stymulacji, natężenie

prądu czy wielkość elektrod (Dedoncker i in., 2016; Hyde i in., 2022). Wyniki takich badań nie do końca mogą być rozpatrywane jako konkluzywne. Aby stymulacja z wykorzystaniem tDCS mogła być skutecznie stosowana, konieczna jest znajomość fizjologicznych mechanizmów działania i ocena efektów takiego oddziaływania w grupie osób zdrowych. Poszerzy to perspektywę naukową, pozwoli lepiej zrozumieć mechanizm działania metody, ale również może dać szansę na pełniejsze wykorzystanie potencjału tego oddziaływania.

Chociaż w literaturze przedmiotu występują prace dotyczące stymulacji tDCS u zdrowych dorosłych, to zazwyczaj stosowane w nich jest oddziaływanie jednokrotne. Natomiast jak wcześniej wspomniano zmiany, których źródłem jest stymulacja tDCS, bazują na zjawisku plastyczności mózgu i wymagają wielokrotnych powtórzeń, aby przynieść zamierzony efekt. z tego powodu w niniejszej pracy podjęto próbę wielokrotnej stymulacji. Analiza publikowanych danych (Baharlouei i in., 2020; Habich i in., 2021; Reinhart i in., 2017; Sarkis i in., 2014), dotyczących usprawniania funkcjonowania poznawczego sugeruje, że tego rodzaju interwencje mogą przyczynić się do istotnej poprawy procesów umysłowych u osób poddanych stymulacji tDCS. Rozważając to zagadnienie w szerszym ujęciu, można upatrywać w takim oddziaływaniu szansy na budowanie rezerwy poznawczej (Stern, 2009; Szepietowska, 2019). Może się to przyczynić do zwiększenia zdolności radzenia sobie z różnego typu wymaganiami w sytuacjach zadaniowych życia codziennego. Ma to również istotne znaczenie w kontekście pomyślnego starzenia się.

W związku z powyższym w niniejszej dysertacji podjęto zagadnienie neuropoznawczych efektów przezczaszkowej stymulacji prądem stałym (tDCS) u zdrowych osób w okresie wczesnej dorosłości. Głównym motywem do podjęcia tego tematu była chęć lepszego poznania możliwości wykorzystania metody przezczaszkowej stymulacji prądem stałym u osób bez deficytów poznawczych, w okresie wczesnej dorosłości. Poznanie i zrozumienie wpływu stymulacji na poszczególne domeny funkcji wykonawczych u osób zdrowych może stanowić bazę, która pozwoli na stosowanie jej jako metody terapii zaburzeń kognitywnych.

Praca składa się z pięciu rozdziałów. Rozdział pierwszy zawiera teoretyczne podstawy badań własnych. Przedstawiono w nim problematykę neuropoznawczych aspektów funkcjonowania człowieka w toku życia, uwzględniając w szczególności okres wczesnej dorosłości. Ponadto scharakteryzowano wybrane procesy poznawcze, ze szczególnym uwzględnieniem procesów, które są istotne z perspektywy badań własnych, czyli składowych

funkcji wykonawczych: pamięć operacyjna, proces pobudzania, proces hamowania oraz proces kontroli działania. Następnie podjęto temat przeczaszkowej stymulacji prądem stałym, omawiając mechanizm jej działania, metody, główne obszary zastosowania, a także jej związek z plastycznością mózgu. Ostatnia część tego rozdziału dotyczy wpływu przeczaszkowej stymulacji prądem stałym na funkcjonowanie poznawcze w świetle dotychczasowych badań. Drugi rozdział stanowi część metodologiczną badań własnych. Przedstawiono w nim cel badań oraz jego uzasadnienie, model badań, problemy, pytania i hipotezy badawcze, a także dokonano operacjonalizacji zmiennych, scharakteryzowano narzędzia badawcze oraz omówiono organizację i przebieg badań własnych. w rozdziale trzecim przedstawiono statystyczną weryfikację postawionych hipotez. Następnie przeprowadzono dyskusję uzyskanych wyników dotyczących przeczaszkowej stymulacji prądem stałym a zmianami w zakresie składowych funkcji wykonawczych. w tej części wskazano również ograniczenia badań własnych. w ostatniej części pracy zaprezentowano wnioski z badań własnych oraz implikacje praktyczne. Ponadto praca składa się z bibliografii, liczącej 371 pozycji, spisu tabel i rysunków.

1. Teoretyczne podstawy badań

1.1. Neuropoznawcze aspekty funkcjonowania człowieka

Szeroko pojęte zachowanie człowieka może być rozpatrywane jako wynik interakcji systemów: poznawczego, emocjonalnego oraz wykonawczego. Pojęcie funkcjonowania poznawczego odnosi się do zdolności i sprawności w odbiorze oraz przetwarzania informacji koniecznych do funkcjonowania jednostki. System emocjonalny odpowiada za emocjonalno-motywacyjną część zachowania, natomiast system wykonawczy wiąże się z ekspresją behawioralną (Lezak, 2012; Nęcka i in., 2020; Wiłkość, 2015). Poszczególne funkcje wymienionych systemów składają się na integralne elementy zachowania, a ich sztuczne wyodrębnianie ma na celu ułatwienie opisu i pomiaru (Lezak, 2012; Nęcka i in., 2020; Shoda i in., 2015; Wiłkość, 2015).

1.1.1. Procesy poznawcze

W neuropsychologii XX wieku przeważał dyskurs naukowy, który skupiał się raczej na funkcjach niż na procesach. Obecnie często te słowa są używane zamiennie i traktowane jako synonimy (Domańska i Borkowska, 2011; Pąchalska i in., 2020). Najogólniej różnicę między tymi pojęciami można wskazać, rozumiejąc, że funkcję wykonuje poszczególne obiekty w systemie, natomiast proces wynika z działania systemu jako całości. W ujęciu strukturalnym, wpisującym się w nurt „dawnej” neuropsychologii, różnica ta nie jest znacząca. Natomiast w podejściu systemowym, w którym mowa jest o złożonym, dynamicznym systemie mózgowym, różnicowanie tych pojęć pozwala lepiej zrozumieć funkcjonowanie człowieka, w tym funkcjonowanie poznawcze. Analizując wzory aktywizacji w mózgu przy użyciu nowych technik neuroobrazowania, można stwierdzić, że konkretne obszary mózgowie są składowymi większych systemów, w obrębie których przebiegają pewne procesy. W takim ujęciu zakłócenie bądź stymulowanie pracy jednego lub kilku z obiektów (obszarów) zmienia dynamikę funkcjonowania całego systemu (Pąchalska i in., 2020). Takie podejście wpisuje się w bloki funkcjonalne w ujęciu Łurii (1967; 1970). Obejmują one: 1) blok energetyczny; 2) blok informacyjny; 3) blok planowania i kontroli.

Układ ten jest niezwykle złożony. Blok energetyczny odpowiada za poziom pobudzenia mózgu i reguluje aktywność całego organizmu. Obejmuje on struktury podkorowe. Blok informacyjny obejmuje struktury korowe. Wiąże się z odbiorem bodźców oraz przetwarzaniem określonych danych w rejonie odpowiedniej modalności. Blok planowania obejmuje płaty czołowe. Odpowiada za koordynację działań mózgu w celu planowania i wykonywania

złożonych czynności (Łuria, 1970). Zatem zgodnie z koncepcją Łurii, mózg składa się z wielu wyspecjalizowanych struktur, które odpowiadają różnym obszarom anatomicznym. Każda z nich ma określone przeznaczenie w przetwarzaniu bodźców zewnętrznych poprzez dokonywanie analizy czy syntezy. Co ważne, układ ten obejmuje obszary mózgu, które nie zawsze znajdują się w bezpośredniej styczności. Wyodrębniają się złożone podsystemy połączone funkcjonalnie. Wykorzystują one różne modalności na zmiennym poziomie komplikacji. Podsystemy tworzą system regulujący, np. proces spostrzegania czy bardziej złożone – funkcje wykonawcze. Czynności wyższe bazują na działaniu struktur elementarnych i tworzą aktywne układy funkcjonalne, które wykorzystują zmienne połączenia pomiędzy wszystkimi swoimi elementami. Połączenia te są dynamiczne, ponieważ w trakcie wykonywania czynności zmieniają się jej wymagania, a co za tym idzie – zmienia się stopień zaangażowania poszczególnych elementów składowych układu (Łuria, 1967; Ormeżowska i in., 2012).

Rozwój nowoczesnych technologii neuroobrazowania, takich jak tomografia komputerowa (*computed tomography*; CT), rezonans magnetyczny (*magnetic resonance imaging*; MRI), elektroencefalografia (*electroencephalography*; EEG) czy magnetoencefalografia (*magnetoencephalography*; MEG), umożliwił badanie aktywności mózgu w czasie rzeczywistym i pozwolił na lepsze zrozumienie złożonych procesów zachodzących w mózgu człowieka. Dzięki temu zaczęto coraz bardziej dostrzegać, że poszczególne obszary mózgu nie działają w izolacji, ale współpracują ze sobą. Przyczyniło się to do wprowadzenia kolejnego pojęcia, bazującego niejako na podejściu zaproponowanym przez Łurię, czyli systemów funkcjonalnych mózgu (Kolb i Whishaw, 2003; Kropotov, 2009). Kolb i Whishaw (2003) wyróżniają trzy główne systemy funkcjonalne mózgu:

1. *System kontrolny (Control System)* – odpowiada za koordynację i kontrolę działań motorycznych, planowanie i organizację zachowań oraz podejmowanie decyzji. Obejmuje on korę przedczołową, która jest ważna dla wykonywania złożonych zadań i funkcji wykonawczych, takich jak myślenie, planowanie, podejmowanie decyzji i kontroli zachowania. w skład systemu kontrolnego wchodzi również obszary kory ruchowej.
2. *System procesów emocjonalnych (Emotional Processing System)* – odpowiada za przetwarzanie i regulację emocji. w skład tego systemu wchodzi m.in. ciało migdałowate, hipokamp i kora obręczy, które są ważne dla przetwarzania informacji emocjonalnych i zapamiętywania ich.

3. *System procesów regulacyjnych (Regulatory Processing System)* – odpowiada za regulowanie czynności życiowych organizmu, takich jak oddychanie, tętno, ciśnienie krwi, poziom glukozy czy hormonów. Obejmuje on m.in. podwzgórze i mózgowy układ autonomiczny, które kontrolują funkcje życiowe organizmu.

Taki podział na systemy funkcjonalne koncentruje się na różnych obszarach mózgu i ich związku z różnymi funkcjami. Jednakże, jak podkreślają Pąchalska i in. (2020), mózg korzysta z dwóch języków: chemicznego i elektrycznego. Oznacza to, że jego funkcjonowanie nie zależy tylko od struktury, na czym skupia się podział Kolba i Wishawa (2003), ale także od złożonych procesów neurochemicznych. Ten fakt stał się przyczyną opracowania kolejnych koncepcji systemów funkcjonalnych mózgu (Kropotov, 2009). W tym kontekście ważne jest uwzględnienie zarówno struktury mózgu, jak i jego funkcjonowania na podstawie procesów chemicznych i elektrycznych. Przykładowo, usprawnienie działania kodu elektrycznego może przynieść znaczne korzyści w przypadku funkcjonowania poznawczego i emocjonalnego osób z uszkodzeniami ośrodkowego układu nerwowego (Pąchalska i in., 2020). Takie techniki, jak neurofeedback czy nieinwazyjne metody stymulacji mózgu (*Non-Invasive Brain Stimulation; NIBS*) stają się coraz bardziej obiecującą metodą w leczeniu różnych zaburzeń neurologicznych i psychiatrycznych (Brunoni i in., 2016; Kropotov, 2009, 2016; Mirski i in., 2015).

To podejście akcentuje dynamiczne aspekty funkcjonowania mózgu u ludzi. Jak wspomniano, nowe koncepcje podkreślają znaczenie nie tylko połączeń między strukturami mózgu, lecz także złożonych procesów neurochemicznych. Interdyscyplinarne badania, łączące dziedziny takie jak neuropsychologia, psychologia poznawcza, neurofizjologia czy biochemia, umożliwiły wyodrębnienie czterech podstawowych systemów funkcjonalnych mózgu:

- 1) system sensoryczny i sieci uwagi;
- 2) system pamięci;
- 3) system wykonawczy;
- 4) system emocjonalny (Frank i in., 2019; Kaczmarek i Markiewicz, 2021; Pąchalska i in., 2020).

W niniejszej pracy podjęto problem wpływu przezczaszkowej stymulacji prądem stałym obszaru F3 zgodnie z systemem umieszczania elektrod na skórze głowy wg EEG 10-20. Obszar zlokalizowany pod elektrodą F3 obejmuje lewą część grzbietowo-bocznej kory

przedczołowej (*dorsolateral prefrontal cortex*; DLPFC) (Nitsche i in., 2009; Radman i in., 2009). Badania wskazują, że ten obszar odgrywa kluczową rolę w funkcjonowaniu pamięci operacyjnej, która jest jednym z elementów składowych funkcji wykonawczych. Takie rozumienie pamięci operacyjnej i funkcji wykonawczych wpisuje się w model Baddeleya i Hitcha (Baddeley i in., 2020; Baddeley, 2002; Baddeley i Hitch, 1994). Model ten został przyjęty przez Kropotova, którego podejście do analizy i stymulacji neurofizjologicznej przyjęto w procedurze badania własnego (Kropotov, 2009, 2016; Pąchalska i in., 2020). Funkcje wykonawcze rozumiane są jako procesy umożliwiające sterowanie działaniem. Klasyfikacja procesów wchodzących w skład funkcji wykonawczych obejmuje:

- 1) proces pobudzania (aktywacja neuronów);
- 2) proces hamowania (dezaktywacja neuronów);
- 3) proces pamięci operacyjnej (związany z operacjami umysłowymi w buforach pamięci);
- 4) proces kontroli działania (związane z porównywaniem uzyskanych wyników z zaplanowanym działaniem i ewentualną zmianą działania, aby uniknąć rozbieżności) (Kropotov, 2009; Pąchalska i in., 2020).

W kolejnych podrozdziałach opisano charakterystykę funkcjonowania poznawczego w toku życia człowieka oraz scharakteryzowano wybrane procesy poznawcze. Opis tych procesów ma na celu lepsze zrozumienie funkcjonowania poznawczego człowieka i odnosi się nie tylko do procesów funkcji wykonawczych, jakie zostały wymienione powyżej, ale skupia się również na bardziej elementarnych procesach.

1.1.2. Charakterystyka funkcjonowania poznawczego w toku życia

Funkcjonowanie poznawcze jest terminem szerokim, ujmowanym w różnorodny sposób w zależności od przyjętego modelu teoretycznego. Jak już wspomniano, wyodrębnienie poszczególnych funkcji ma charakter umowny i służy ułatwieniu opisu czy pomiaru danej funkcji. w obrębie każdego z obszarów aktywności umysłowej wyróżnić można bardziej elementarne funkcje poznawcze, które są ze sobą ściśle związane i tworzą różne aspekty tego samego procesu (Lezak, 2012; Pąchalska i in., 2020; Schmahmann i in., 2019; Wiłkość, 2015).

Jedyne, co jest stałe, to zmiana. To sformułowanie idealnie wpisuje się w koncepcje współczesnej psychologii rozwoju człowieka, gdzie rozwój ujmowany jest jako proces trwający przez całe życie (*life-span development*). Za prekursorkę tego podejścia uznaje się Bühler, która napisała książkę *Bieg życia ludzkiego* (Bühler, 1933). Propaguje ona zasadę holizmu, zgodnie z którą wartościowe są tylko takie badania, które ujmują całość biegu życia. Ponadto warto

zwrócić uwagę na multidyscyplinarne podejście do rozwoju człowieka. Życie przebiega w stale zmieniających się i wpływających na siebie nawzajem warunkach i okolicznościach (Brzezińska i in., 2015). Bee i in. (2004) wyróżniają trzy typy zmian rozwojowych. Zalicza się do nich zmiany: uniwersalne, wspólne dla konkretnej grupy osób oraz indywidualne.

Zmiany uniwersalne są powszechne i ulegają im wszyscy ludzie w danej grupie wiekowej (*age-graded changes*). Są one determinowane biologicznymi procesami dojrzewania oraz sposobem oddziaływania otoczenia fizycznego i społecznego (Bee i in., 2004; Brzezińska i in., 2015). Warto podkreślić, iż wiek jest rozumiany jako zmiany związane z dojrzewaniem biologicznym z jednej strony oraz uniwersalnymi doświadczeniami społecznymi z drugiej (Brzezińska i in., 2015). Można to poniekąd odnieść do relacji człowiek – czas, gdzie funkcjonowanie człowieka zależne jest od zegara biologicznego, społecznego oraz słonecznego (Kontrymowicz-Ogińska, 2011; Wiłkość, 2015). Działanie zegara biologicznego i społecznego powoduje, że ludzie mają podobne doświadczenia, a w konsekwencji ich przeżycia również są podobne. Przykładem współoddziaływania sfery biologicznej i społecznej jest okres przejściowy między dzieciństwem a dorosłością. Jest to czas wielu zmian biologicznych, związanych z dojrzewaniem oraz licznych oczekiwań i wyzwań społecznych. Wtedy właśnie pojawiają się pytania: „Kim jestem?”, „Co dalej z moim życiem?” (Brzezińska i in., 2015).

Można więc uznać, że wyodrębnienie przedziałów wiekowych związane jest z tym, że życie ludzi w przybliżonym wieku toczy się podobnym torem, związane jest z podobnymi wyzwaniami i osiągnięciami rozwojowymi w podobnych obszarach aktywności. w każdej grupie wiekowej „tyka” zegar społeczny, który wyznacza, co i jak powinno się robić, oraz zegar biologiczny, który określa, co jest możliwe do zrobienia na danym etapie dojrzałości organizmu (Brzezińska i in., 2015). Dzięki temu możliwe jest wyodrębnienie pewnych okresów rozwojowych, typowych dla danego wieku.

Istnieje wiele teorii rozwoju człowieka. Jak zauważa Trempała, istnieją momenty przełomowe w badaniach nad rozwojem człowieka. Jednym z nich jest przejście od uniwersalności i stałości do indywidualności, wielokierunkowości i plastyczności w obrębie zmian rozwojowych (Trempała, 2001). Dane empiryczne wskazują, że rozwój nie jest czymś globalnym, obejmującym cały organizm w jednakowym stopniu. Zarówno wzrost i integrowanie się funkcji na wczesnych etapach życia, jak i ubytki oraz rozpad w okresie starzenia się nie mają charakteru całościowego – jest to plastyczny proces zmian wielokierunkowych. Zatem rozwój to zespół procesów, dzięki którym dochodzi do zmian

w ciągu całego życia (Formisano i in., 2022; Trempała, 2001). Zmiany te dotyczą wszystkich sfer funkcjonowania, również funkcjonowania kognitywnego. Jak wskazują badania, zdolności poznawcze są ważnym predyktorem osiągnięć życiowych, zdrowia, a nawet śmiertelności (Batty i in., 2007; Lövdén i in., 2020; Strenze, 2007). Rozwój poznawczy człowieka jest zróżnicowany, a poszczególne funkcje rozwijają się w odmiennym tempie w różnym wieku (Boen i in., 2021).

Pierwszy okres rozwoju obejmuje wczesne dzieciństwo – trzy pierwsze lata życia (Bielecka-Pikul, 2011). Najnowsze badania nad wczesnym rozwojem poznawczym doprowadziły naukowców do wniosków, że rozwijający się umysł jest zadziwiająco kompetentny, aktywny i wnikliwy już od najmłodszych lat (Allen i Kelly, 2015). w chwili narodzin najlepiej rozwiniętą częścią układu nerwowego są śródmózgowie oraz rdzeń przedłużony (Bee i in., 2004). Odpowiadają one za podstawowe funkcje, takie jak: uwaga i habituacja, a także czuwanie czy wydalanie. w pierwszych miesiącach życia mówi się o rozwoju psychomotorycznym. Jest to wzajemna relacja między percepcją, pamięcią, aktywnością a dojrzewaniem układu nerwowego (Bielecka-Pikul, 2011). Już w pierwszym roku życia widoczne są w zachowaniu dziecka przejawy funkcjonowania podstawowych systemów pamięci: proceduralnej, deklaratywnej i operacyjnej (Bielecka-Pikul, 2011; Jagodzińska, 2012). Trzymiesięczne dziecko potrafi utrzymać w pamięci związek między zdarzeniami nawet przez osiem dni. z kolei po 14 dniach wspomnienie zostaje całkowicie zatarte (Bielecka-Pikul, 2011). Badania nad pamięcią roboczą, prowadzone w paradygmacie habituacji, wskazują, że w pierwszym roku życia objętość tej pamięci wynosi trzy, cztery elementy (Bielecka-Pikul, 2011; Rose i in., 2001). Prawdopodobnie ma to związek z rozwojem płatów czołowych, które intensywnie dojrzewają pod koniec pierwszego roku życia. Przyczynia się to właśnie do wzmocnienia m.in. pamięci (Liston i Kagan, 2002). Od około 18. miesiąca życia rozwijają się reprezentacje symboliczne, wzrasta trwałość i zakres pamięci (Bielecka-Pikul, 2011). w drugim i trzecim roku życia reprezentacje zdarzeń są już uporządkowane zgodnie z relacjami czasowymi. Obserwuje się również znaczący wzrost trwałości i zakresu pamięci (Jagodzińska, 2012). Dzieci w wieku od trzech do pięciu lat uzyskują w prostych badaniach pamięci, dotyczących rozpoznawania, wyniki podobne do osób dorosłych (Jagodzińska, 2012). z kolei w zadaniach związanych z pamięcią utajoną nie stwierdza się znaczących zmian rozwojowych. Już przedszkolaki uzyskują wyniki podobne jak starsze dzieci czy dorośli (Jagodzińska, 2012). Natomiast deficyty są widoczne w zadaniach angażujących strategie pamięciowe. Tak małe dzieci nie są w stanie spontanicznie stosować

strategii podczas zapamiętywania i przypominania – jest to deficyt produkcyjny. Ponadto zastosowanie strategii nie zawsze prowadzi do podwyższenia efektów – jest to deficyt mediacyjny lub deficyt wykorzystania (Jagodzińska, 2012).

W zakresie percepcji od około trzeciego miesiąca życia rozwija się widzenie dwuoczne (binokularne), które umożliwia widzenie głębi, z kolei już czteromiesięczne dzieci są świadome stałości wielkości przedmiotów (Bielecka-Pikul, 2011). Następnie rozwija się umiejętność łączenia schematów, gdzie jeden jest wykorzystywany jako środek, a drugi – jako cel czynności. Jest to początek koordynacji działań w celu rozwiązania problemu (Bee i in., 2004; Bielecka-Pikul, 2011).

Kolejny etap rozwojowy to okres średniego dzieciństwa, czy inaczej – wiek przedszkolny. Obejmuje on okres od czwartego do szóstego roku życia (Bee i in., 2004; Kielar-Turska, 2011). Jest to czas dalszych intensywnych przemian i rozwoju, okres przejściowy między poznaniem mimowolnym, zwykle ukierunkowanym na zewnątrz, a dowolnym, kierowanym w sposób świadomy (Kielar-Turska, 2011). Zachodzące zmiany mają podłoże biologiczne i są odpowiedzią na aktywność podejmowaną przez dziecko, związaną z oddziaływaniem środowiska (Kielar-Turska, 2011). Na wiek przedszkolny przypada intensywny rozwój kory przedczołowej (Allen i Kelly, 2015; Bassett i in., 2012; Tsujimoto, 2008). Rozwija się ona znacząco, zarówno pod względem wydajności, jak i specjalizacji neuronalnej aż do okresu dojrzewania (Davidson i in., 2006; Fiske i Holmboe, 2019; Holmboe i in., 2021; Tsujimoto, 2008). Kora przedczołowa odgrywa istotną rolę w różnych wyższych funkcjach poznawczych. Właśnie w okresie średniego dzieciństwa rozwijają się funkcje zarządzające (funkcje wykonawcze, *executive functions*). To one, ogólnie ujmując, pozwalają na kierowanie działaniem w sposób zorganizowany i przemyślany (Kielar-Turska, 2011; Kosno i Byczewska-Konieczny, 2015). Wśród komponentów funkcji zarządzających wymienia się m.in. planowanie, hamowanie, wnioskowanie czy rozumienie języka (Allen i Kelly, 2015; Kosno i Byczewska-Konieczny, 2015). Przykładowo, przerzutność uwagi rozwija się około czwartego roku życia, a najintensywniejszy rozwój hamowania reakcji przypada między piątym a ósmym rokiem życia (Bassett i in., 2012; Lee i in., 2015). Co ważne, umiarkowane postępy w tym zakresie widoczne są aż do wczesnej dorosłości (Best i Miller, 2010). Ponadto widoczne są zmiany w funkcjonowaniu pamięci. Zwiększa się zakres i trwałość zapamiętywania. Dziecko buduje poznawczą reprezentację rzeczywistości (Kielar-Turska, 2011). Jest w stanie organizować informacje w pamięci poprzez tworzenie tematycznych

struktur obiektów i skryptów jako organizacji zdarzeń (Kielar-Turska, 2011). Widoczny jest również znaczący wzrost kompetencji językowych (Bee i in., 2004).

Następnie dziecko wchodzi w okres późnego dzieciństwa. Przypada ono na wiek od około sześciu lat do dziesięciu, dwunastu (Kołodziejczyk, 2011). Zmiany w rozwoju nie są aż tak spektakularne i widoczne, jak na wcześniejszych etapach (Kołodziejczyk, 2011). w funkcjonowaniu poznawczym na uwagę zasługuje rozwój operacji logicznych i myślenia indukcyjnego (Bee i in., 2004; Kołodziejczyk, 2011). Jest to również czas rozwoju funkcji uwagowych. Uwaga staje się bardziej dowolna, selektywna i planowa. Ponadto zwiększa się możliwość adaptacji uwagi (Kołodziejczyk, 2011). Obserwuje się również rozwój funkcji językowych (Bee i in., 2004).

Kolejny etap obejmuje czas dorastania, inaczej nazywany adolescencją. Jest to przejściowy okres między dzieciństwem a dorosłością, obejmujący szereg zmian w wielu obszarach funkcjonowania. Przyjmuje się, że dorastanie przypada od 10–12 do 20–24 roku życia (Oleszkowicz i Senejko, 2011; Sawyer i in., 2018). Biorąc pod uwagę specyfikę rozwoju biologicznego oraz zakończenie etapu edukacji, adolescencję dzieli się na dwa podokresy: wczesne dorastanie (od 10 do 16 lat) i późne dorastanie (od 17 do 20–24 lat) (Oleszkowicz i Senejko, 2011). w tym czasie następuje rozwój myślenia formalnego oraz relatywistycznego, a także dedukcji (Bee i in., 2004; Oleszkowicz i Senejko, 2011). Ponadto wzrasta częstość i skuteczność posługiwania się strategiami pamięciowymi, celowego zapamiętywania oraz następuje rozwój metapamięci (Bee i in., 2004; Oleszkowicz i Senejko, 2011). Intensywnie rozwija się również kontrola poznawcza (Dumontheil, 2016).

Następne stadium rozwojowe to wczesna dorosłość. Określenie ram czasowych tego etapu jest dość problematyczne (Gurba, 2011). Nie zachodzą już tak wyraźne zmiany fizyczne, jak miało to miejsce wcześniej. Występują natomiast różnice międzypersonalne związane z doświadczeniami i osiągnięciami. Przyjmuje się, że wczesna dorosłość przypada na okres od około 20–22 do 35–40 roku życia (Gurba, 2011). Na dolną granicę tego okresu zazwyczaj przypada przyznanie pełni praw i obowiązków obywatelskich. z kolei górna granica, jeszcze bardziej umowna, związana jest z osiągnięciem stabilizacji życiowej (rodzinnej, zawodowej) oraz z pierwszymi oznakami starzenia się biologicznego (Gurba, 2011). Warto podkreślić, że badacze raczej skłaniają się, by wczesną dorosłość opisywać jako proces „stawania się dorosłym” (Gurba, 2011).

Pod względem funkcjonowania poznawczego, osoby w okresie wczesnej dorosłości prezentują optymalną formę. w szczególności dotyczy to takich procesów jak percepcja, pamięć czy uwaga (Bee i in., 2004; Gurba, 2011; Lövdén i in., 2020). Nie odnotowuje się istotnych różnic w funkcjonowaniu poznawczym między osobami w okresie adolescencji a młodymi dorosłymi. We wczesnej dorosłości dochodzi do stabilizacji procesów intelektualnych. Doskonali się wówczas myślenie formalno-operacyjne (Bee i in., 2004; Gurba, 2011). Dane z badań, również neuroobrazowych, wskazują, że funkcje wykonawcze, uwaga i koordynacja ruchowa są podporządkowane sieciom czołowym. Rozwijają się one jeszcze we wczesnej dorosłości, a dojrzałość osiągają około 25 roku życia (Huizinga i in., 2006; Sowell i in., 2003; Taylor i in., 2013). Jest to zgodne z szablonem rozwoju mielinizacji, który przebiega w kierunku od tyłu do przodu (Gogtay i in., 2004; Lebel i in., 2008; Tau i Peterson, 2010).

Ponadto, z badań dotyczących czynników składających się na poszczególne zdolności poznawcze wynika, że w okresie między 20 a 50 rokiem życia występują jedynie nieznaczne zmiany w konfiguracji nasycenia poszczególnych czynników. Oznacza to, iż w tym okresie ogólne funkcjonowanie poznawcze raczej jest zachowane na podobnym poziomie (Cunningham i Birren, 1980; Gurba, 2011).

Kolejnym etapem jest średnia dorosłość, która obejmuje wiek od 35–40 do 60–65 roku życia (Olejnik, 2011). Przyjmuje się, że jest to okres względnej stabilności wcześniej rozwiniętych zdolności poznawczych, a w niektórych obszarach obserwuje się ich wzrost (Bee i in., 2004; Olejnik, 2011). Poprawa dotyczy m.in. zasobu słownictwa czy ogólnie funkcji językowych oraz zdolności rozwiązywania problemów związanych z pragmatyką życia (Anstey i in., 2014; Bee i in., 2004). Można zaobserwować nieznaczne pogorszenie wyników w zakresie szybkości przetwarzania i czasu reakcji (Anstey i in., 2014). Jednocześnie – w ogólnym, globalnym funkcjonowaniu poznawczym – zmiany te nie są znaczące (Anstey i in., 2014; Olejnik, 2011). Teorie rozwoju poznawczego w ciągu całego życia wskazują, że zdolności typu płynnego, w tym szybkość przetwarzania, rozumowanie i pamięć robocza, podążają za rozwojem neurologicznym i zmniejszają się w połowie życia, podczas gdy zdolności werbalne wzrastają (Baltes i in., 1999). Nie wszystkie badania jednak to potwierdzają. Przykładowo, Anstey wraz z zespołem (2014) w badaniach podłużnych nie stwierdził pogorszenia wyników w pomiarach bezpośredniego przypominania ani pamięci operacyjnej. Zdolności pamięciowe wykazywały trajektorię, która była podobna do zdolności werbalnych.

Ostatnim etapem rozwoju jest późna dorosłość, czyli starość. Zaczyna się od 60–65 roku życia (Straś-Romanowska, 2011). Jest to naturalny, schyłkowy okres życia człowieka. Zmiany regresywne przewyższają wówczas zmiany progresywne (Bee i in., 2004; Straś-Romanowska, 2011). Starzejący się mózg ulega zmianom strukturalnym nawet u zdrowych osób (Bagarinao i in., 2022). Obserwuje się utratę tkanki w całkowitej substancji szarej i istocie białej. w całym mózgu tempo spadku substancji szarej jest różne, przy czym w regionach płatów czołowych i ciemieniowych obserwuje się szybsze tempo spadku, podczas gdy w niektórych obszarach płatów potylicznych i skroniowych jest ono nieznaczne (Bagarinao i in., 2022; Merenstein i Bennett, 2022). w zakresie funkcjonowania poznawczego obserwuje się pogorszenie funkcji wzrokowo-motorycznych. Ma to związek ze słabnięciem wrażliwości zmysłowej (Straś-Romanowska, 2011). Osłabiają się funkcje uwagowe, takie jak koncentracja, przerzutność czy selektywność (Straś-Romanowska, 2011). Obniżają się także zdolności pamięciowe, zwłaszcza w zakresie przyswajania nowych informacji (Bee i in., 2004). Jednocześnie jest to etap, w którym widoczne jest duże zróżnicowanie indywidualne i heterogeniczność normalnego starzenia się mózgu (Bee i in., 2004; Eavani i in., 2018; Poulakis i in., 2021; Straś-Romanowska, 2011).

Reasumując, rozwój człowieka jest złożonym procesem, który obejmuje zmiany we wszystkich sferach funkcjonowania, w tym również funkcjonowania poznawczego. Badania sugerują, że zdolności poznawcze są istotnym predyktorem osiągnięć życiowych, zdrowia i śmiertelności. Różne funkcje poznawcze rozwijają się w różnym tempie w zależności od wieku. Ważne jest również zauważenie, że rozwój człowieka nie jest jednorodny, ale obejmuje indywidualne i wielokierunkowe zmiany, zarówno wzrost jak i ubytki, które są plastycznym procesem trwającym przez całe życie. Wartościowe badania powinny uwzględniać całość tego procesu

1.1.3. Charakterystyka wybranych procesów poznawczych

Poniżej przedstawiono charakterystykę procesów poznawczych, które są istotne z perspektywy przeprowadzonych badań własnych. Ma ona na celu lepsze zrozumienie funkcjonowania poznawczego człowieka i odnosi się nie tylko do funkcji wykonawczych, ale skupia się również na bardziej elementarnych procesach. Założenie o systemach funkcjonalnych mówi, że praca mózgowia składa się z wielu systemów i podsystemów, a ich działanie się przeplata.

Pamięć. Pamięć jest złożonym i wielowymiarowym obszarem poznawczym, składającym się z wyraźnie zróżnicowanych systemów. Wraz ze wzrostem wiedzy na temat pamięci, zwiększa się liczba pojęć z nią związanych. Obecnie pamięć rozpatrywana jest raczej jako zespół zintegrowanych systemów aniżeli jako pojedynczy system (Bowman i Zeithamova, 2018; Kolb i Whishaw, 2003; Pąchalska i in., 2020).

Złożoność pamięci odzwierciedlają liczne klasyfikacje, które powstają na bazie różnorodnych kryteriów opisu, takich jak: rodzaj treści czy sposób przypominania informacji. Potwierdzenie tak dużej różnorodności widoczne jest również w wynikach badań neuroobrazowych (Budson i Price, 2005; Pąchalska i in., 2020; Squire, 2004; Wiłkość, 2015). Pamięć może być rozpatrywana i rozumiana w różnych znaczeniach. Najczęściej jest ona opisywana jako:

1. zdolność do kodowania, przechowywania i wydobywania informacji;
2. hipotetyczny magazyn (system) umysłowy, służący do przechowywania informacji;
3. wewnętrzny zapis (reprezentacja) wcześniejszych doświadczeń;
4. zbiór procesów tworzących wewnętrzną reprezentację wcześniejszego doświadczenia, który pozwala na jego przechowywanie oraz wydobycie (Jagodzińska, 2012; Pąchalska i in., 2020; Tulving, 1972; Wiłkość, 2015).

Pamięć i procesy z nią związane, tj. kodowanie, przechowywanie, wydobywanie, stanowią bazę procesu uczenia się, w wyniku którego dochodzi do względnie trwałych zmian w zachowaniu. Możliwe jest to dzięki zjawisku plastyczności mózgu (Herzyk, 2015; Jagodzińska, 2012; Lezak, 2012; Longstaff, 2006; Wiłkość, 2015).

Pamięć robocza (operacyjna). Pojęcie pamięci roboczej początkowo odnosiło się do opisu pamięci łatwo dostępnej, niezbędnej do wykonania bieżącego działania czy planu (Miller i in., 1960). Obecnie tego terminu używa się dla podkreślenia aktywnego charakteru przetwarzania informacji w pamięci krótkotrwałej (Fuster, 2001; Wiłkość, 2015).

Baddeley i Hitch (1974), twórcy najpopularniejszego modelu pamięci roboczej, uzupełnili nim pojęcie pamięci krótkotrwałej. Nazwy tych dwóch konstruktów wskazują na różnice pomiędzy nimi. Pamięć krótkotrwała odnosi się jedynie do kryteriów czasowych, tj. świadomego przechowywania informacji przez krótki czas, natomiast pamięć robocza do kryteriów funkcjonalnych, tj. przechowywania, a także manipulowania informacjami niezbędnymi do wykonania danego zadania (Baddeley i Hitch, 1994; Jodzio, 2006; Kurcz,

1995; Pąchalska i in., 2020). w zrewidowanej koncepcji pamięci roboczej Baddeley (2000, 2002, 2003) wyróżnia: niezależny od modalności centralny system wykonawczy, pętlę fonologiczną, notes wzrokowo-przestrzenny oraz bufor epizodyczny. Należy podkreślić, iż centralny system wykonawczy jest nadrzędną strukturą wobec trzech pozostałych systemów. Jego zadanie polega na odbieraniu informacji z różnych modalności, selekcjonowaniu ich, przetwarzaniu oraz przekazywaniu do pamięci długotrwałej. Centralny system wykonawczy określa to, na czym zostanie skupiona uwaga. Można go utożsamiać z centralną częścią pola uwagi, w której wykonywane są różne operacje umysłowe (Maruszewski, 1996; Nęcka i in., 2013; Pąchalska i in., 2020; Repovs i Baddeley, 2006; Smith i Jonides, 1998; Wiłkość, 2015). Metody neuroobrazowania wskazują na to, iż mózgowym korelatem centralnego ośrodka wykonawczego jest kora przedczołowa (Bar, 2003; Jodzio, 2006).

Według niektórych autorów centralny system wykonawczy w modelu Baddeleya i Hitcha może być utożsamiany z uwagą wykonawczą. w takim ujęciu interakcja pamięci roboczej oraz uwagi wykonawczej jest podstawą dla rozwoju szerokiej gamy zdolności poznawczych, takich jak uczenie się, rozumowanie, rozumienie języka, a także inteligencji ogólnej. Związane jest to z tym, że uwaga wykonawcza odpowiada za zdolność do nieświadomego wzbudzenia, utrzymania i kontrolowania ukierunkowania na bodziec czy też wykonania celowej czynności (Engle, 2002; Engle i Kane, 2003; Kane i in., 2006).

Uwaga. Uwaga jest procesem złożonym, dynamicznym, wielowymiarowym, przez co jej charakter i istota są w odmienny sposób opisywane przez badaczy. Brak jest zgodności, co do tego, czy uwaga stanowi odrębny proces czy też wchodzi w skład innych procesów poznawczych. Prowadzi to do powstania różnych definicji, w zależności od tego, z jakiej perspektywy jest ona opisywana (Couperus, 2011; Kolb i Whishaw, 2003; Mole i Henry, 2022).

W najogólniejszym ujęciu, pojęcie uwagi odnosi się do zespołu fizjologicznych i behawioralnych reakcji człowieka na bodźce, które napływają ze środowiska (Choudhury i Gorman, 2000; Lindsay, 2020). Jest to system, którego zadanie polega na selekcji informacji po to, by zapobiegać negatywnym skutkom przeciążenia systemu poznawczego poprzez nadmiar informacji (Nęcka i in., 2013). Większość definicji uwagi koncentruje się na opisie jej składników (Kolb i Whishaw, 2003; Mesulam, 2000; Pąchalska i in., 2020; Posner i Petersen, 1990). z perspektywy neuropsychologii procesy jedną z najbardziej przydatnych definicji uwagi prezentuje Parasuraman (1998). Na podstawie wieloletnich badań nad neuropsychologicznymi i neurofizjologicznymi uwarunkowaniami procesów uwagi, autorka podaje za zasadny podział na trzy względnie niezależne komponenty:

1. selektywność uwagi – wysoce zautomatyzowana zdolność dokonywania wyboru jednego bądź kilku bodźców do przetwarzania, z jednoczesnym wykluczeniem innych bodźców obecnych w otoczeniu;
2. koncentracja uwagi – zdolność skupienia się na określonym zadaniu przy wykluczeniu innych bodźców;
3. sterowanie (metauwaga) – proces podejmowania świadomych decyzji, które wskazują, na co należy zwracać uwagę w danej chwili, czy zachodzi konieczność przekierowania uwagi na inny bodziec, a także określa moment podjęcia na nowo przerwanej zadania. Wiąże się to z koniecznością przydzielania optymalnych zasobów poznawczych i mózgowych potrzebnych do wykonania danego zadania. Metauwaga wymaga świadomych wyborów, w odróżnieniu od dwóch wcześniejszych komponentów (Parasuraman, 1998; Pąchalska, 2009; Pąchalska i in., 2020).

Wśród współczesnych wyjaśnień istoty uwagi występuje tendencja do rozpatrywania jej z innymi procesami poznawczymi, które uwzględniają występowanie odrębnych systemów mózgowych. W szczególności dotyczy to tych form uwagi, które łączą się z działaniami bardziej złożonymi i wolicjonalnymi związanymi z funkcjonowaniem wyższych piętér mózgu (Kolb i Whishaw, 2003; Mole i Henry, 2022; Pąchalska, 2009; Pąchalska i in., 2020).

Z perspektywy przeprowadzonych badań własnych istotne wydaje się neuropoznawcze rozumienie uwagi zaproponowane przez Posnera i Petersena (Petersen i Posner, 2012; Posner i Petersen, 1990). Zgodnie z tym podejściem procesy uwagowe pełnią trzy kluczowe funkcje, a każdej z nich odpowiada inna mózgowa sieć neuronalna. Pierwsza z nich, czujność (mechanizm aktywacyjny), odpowiada za osiągnięcie lub zwiększenie gotowości, pobudzenie organizmu w odpowiedzi na zewnętrzne bodźce. Stan ten jest utrzymywany aż do momentu zrealizowania danego zadania. Za mózgowy korelaty czujności uwagi uznawane są miejsce sinawe oraz obszary kory czołowej i ciemieniowej (Pozuelos i in., 2014). Kolejną z wyodrębnionych funkcji uwagi w tym modelu to orientacja. Zaangażowana jest ona w selekcjonowanie napływających do organizmu informacji poprzez detekcję sygnałów (ale nie ich identyfikację) oraz orientowanie, czyli skierowanie się ku źródłu bodźca. Nazywane jest to reakcją reorientacji. Zadaniem mechanizmu orientacyjnego jest również przenoszenie uwagi z jednego obiektu na inny. Włączenie tego mechanizmu odbywa się automatycznie, zawsze wtedy, gdy w polu percepcyjnym nastąpi jakaś zmiana stymulacji. Mózgowymi korelatami tych procesów są głównie struktury podkorowe, tj. wzgórkę czworacze górne, dolna i górna kora ciemieniowa oraz czołowe pola wzrokowe (Abundis-Gutiérrez i in., 2014; Nęcka i in., 2013;

Petersen i Posner, 2012; Posner i Petersen, 1990; Pozuelos i in., 2014; Rueda i in., 2012). Trzecią, wyróżnianą przez Posnera i Petersena, funkcją uwagi jest świadome, wolicjonalne regulowanie odpowiedzi, a także myśli i emocji, szczególnie podczas doświadczania i rozwiązywania konfliktów poznawczych. Angażuje ono przednią część zakrętu obręczy, korę przedczołową i jądra podstawy. Struktury te tworzą tzw. neuronalną sieć uwagi wykonawczej. Odpowiada ona za procesy kontroli, takie jak odporność na dystraktory czy interferencja, hamowanie odruchu orientacyjnego i narzucającej się reakcji, czasowe wstrzymanie podjętych działań, a następnie ich kontynuacja lub też koordynowanie wielu form aktywności. Tym samym kontrola uwagowa ma charakter wewnętrzny oraz zarządczy, decydujący o tym, które informacje i w jaki sposób będą podlegały dalszemu przetworzeniu (Abundis-Gutiérrez i in., 2014; Cuevas i Bell, 2014; Fan i in., 2002; Garon i in., 2008; Nęcka i in., 2013; Petersen i Posner, 2012; Posner i Petersen, 1990; Pozuelos i in., 2014; Rueda i in., 2012; Wronka, 2004). Do pewnego stopnia pokrywa się ona ze strukturami bardziej ogólnego konstruktów, jakim są funkcje wykonawcze.

Funkcje wykonawcze. Funkcje wykonawcze są stosunkowo nowym terminem. w literaturze neuropsychologicznej pojawił się on dopiero w latach 90. ubiegłego wieku pod wpływem badań Baddeleya (1986) nad pamięcią operacyjną. Funkcje wykonawcze odnoszą się do świadomej i ukierunkowanej aktywności człowieka. Odpowiadają za podejmowanie zamierzonego i selektywnego działania, wyznaczanie celu tej aktywności oraz planowanie i kontrolowanie jej przebiegu (Jodzio, 2008; Wiłkość, 2015). Zgodnie z obecnym podejściem panującym m.in. w neuronauce, przyjmuje się, że funkcje wykonawcze stanowią pojęcie nadrzędne dla funkcji poznawczych. Lezak wraz ze swoim zespołem (2004, 2012) proponuje, by traktować je odrębnie od funkcji poznawczych. Inne teorie wskazują jednak, że funkcje wykonawcze są częścią funkcji poznawczych (Roberts i in., 1998). w niniejszym badaniu funkcje wykonawcze są rozumiane jako system poznawczy, który zarządza innymi procesami poznawczymi (Pąchalska i in., 2020).

W ogólnym rozróżnieniu wskazuje się na to, że funkcje poznawcze powiązane są z tym, co i jak dużo osoba wie lub może zrobić, natomiast funkcje wykonawcze decydują o tym, czy i jak oraz kiedy osoba wykona daną czynność. Tworzą więc spójną całość i nie można ich rozpatrywać w oderwaniu od siebie. Funkcje te odgrywają rolę wewnętrznych regulatorów zachowania we wszystkich jego aspektach, czyli: ruchowym, emocjonalnym, poznawczym (Herzyk, 2015; Lezak, 2012; H. Takeuchi i in., 2013; Wiłkość, 2015).

Funkcje wykonawcze nie są strukturą jednorodną. Koncepcje związane z tymi funkcjami dzielą się na trzy główne nurty, wedle których są one rozumiane jako system kontroli, system planowania bądź też wpisują się w modele wieloczynnikowe (Ferguson i in., 2021; Wiłkość, 2015). Stuss (2011) do funkcji wykonawczych zalicza:

1. inicjowanie, rozumiane jako umiejętność określenia celu i skierowania zachowania w stronę jego osiągnięcia;
2. inhibicję, odnoszącą się do zdolności hamowania zachowań skierowanych na cele nieistotne lub drugorzędne;
3. elastyczność/giętkość, rozumianą jako umiejętność dostosowania zachowania do zmieniających się wymagań sytuacji;
4. planowanie, będące zdolnością do organizowania i programowania zachowania zgodnie z wcześniejszymi celami;
5. przewidywanie, czyli umiejętność oceny konsekwencji planowanych działań;
6. samokontrolę, czyli zdolność do obserwacji i dostosowywania własnych zachowań wobec wymagań sytuacji;
7. weryfikację, będącą umiejętnością oceny rezultatów podjętych aktywności;
8. korektę, czyli zdolność do działania, które ma na celu modyfikację rezultatów podjętych zachowań oraz przekierowanie aktywności na inne cele.

Inni badacze w swoich koncepcjach związanych z funkcjami wykonawczymi, również umieszczają powyższe elementy w różnych konfiguracjach i nadają im różne znaczenie

Do niedawna termin „funkcje wykonawcze” był utożsamiany z terminem „funkcje płatów czołowych”. w świetle najnowszych badań można stwierdzić, że płaty czołowe odgrywają ważną rolę w funkcjach wykonawczych (np. w planowaniu i organizacji zachowania), natomiast są one częścią szerszej sieci pracy mózgu (Gilbert i Burgess, 2008; Pąchalska i in., 2020; Zink i in., 2021). w prawidłowym działaniu procesów związanych z funkcjami wykonawczymi decydujące znaczenie ma obwód: jądra podstawy – wzgórze – kora mózgowa. Kora przedczołowa jest jego najistotniejszym elementem, natomiast w świetle nowych badań wskazuje się duże znaczenie przedniej części zakrętu obręczy (Stuss, 2011; Suchy, 2016; Zink i in., 2021). Wiąże się ona z działaniem układu nagrody, czyli odczuwaniem potrzeby działania oraz zadowolenia z osiągniętych rezultatów. Ważną rolę odgrywa tutaj dopamina, będąca głównym mediatorem układu wykonawczego. Występuje ona w korowych obszarach okolicy przedczołowej, w której działa przez receptory z rodziny D1 oraz w jądrach

podstawy, w których działa za pomocą receptorów z rodziny D2. Warto zaznaczyć, że leki regulujące poziom dopaminy zmniejszają również zaburzenia funkcji wykonawczych, m.in. w ADHD i schizofrenii (Alexander i in., 1986; Fusar-Poli i in., 2012; Pąchalska i in., 2020).

To, co jest istotne i warto podkreślić to fakt, iż ze względu na swoją złożoność, funkcje wykonawcze są trudne do precyzyjnego, jednoznacznego zdefiniowania, a tym bardziej zoperacjonalizowania (Carlson, 2005; Ferguson i in., 2021). Nie ma jednej metody, która badałaby wszystkie aspekty funkcji wykonawczych (Williams i Thayer, 2009). Inną trudność stanowi ponadto niemożność badania procesów zarządczych w oderwaniu od procesów przez nie kontrolowanych. Nie istnieje zatem metoda pomiaru sprawności funkcji wykonawczych, która wykluczałaby udział procesów elementarnych, w tym uwagowych czy związanych z pamięcią (Friedman i Miyake, 2017; Nęcka i in., 2020).

W przeprowadzonym badaniu zdecydowano się na rozumienie funkcji wykonawczych zaproponowane przez Kropotova (Kropotov, 2009; Pąchalska i in., 2020). Podejście to bazuje na neurofizjologicznych czynnikach, które stanowią podstawę analizowanych procesów. Zgodnie z tym podejściem, można wyodrębnić cztery procesy, które pozwalają na sterowanie działaniem:

1. proces pobudzania, który aktywuje neurony w korze czołowo-ciemieniowej, co pozwala na planowanie i wykonanie danego działania;
2. proces hamowania, który dezaktywuje neurony w korze czołowej, dzięki czemu możliwe jest powstrzymanie się od zaplanowanego działania;
3. proces pamięci operacyjnej, którego zadaniem jest przechowywanie planu działania przez okres od kilku minut do kilku godzin, co ma na celu aktywne wykorzystanie tej informacji przy pobudzeniu i/lub hamowaniu działania;
4. proces kontroli działania, który odpowiada za porównanie wyników wykonanego działania z zaplanowanym działaniem, co ma na celu zmianę działania, aby uniknąć rozbieżności (Kropotov, 2009; Pąchalska i in., 2020).

Takie podejście do funkcji wykonawczych pokazuje, jak rozległe procesy są konieczne do prawidłowego funkcjonowania. Przyjęte tutaj rozumienie funkcji wykonawczych stanowi rozszerzenie modelu pamięci roboczej Baddeleya i Hitcha (Baddeley, 1986, 2003; Baddeley i Hitch, 1994). z perspektywy założeń niniejszego projektu badawczego, szczególna uwaga jest kierowana na pamięć operacyjną oraz obszar, który jest z nią związany, czyli grzbietowo-

boczną korę przedczołową (*dorsolateral prefrontal cortex*; DLPFC) (Barbey i in., 2013; Nejati i in., 2018; Smith i Jonides, 1998).

1.2. Przewodząca stymulacja prądem stałym

Przewodząca stymulacja prądem stałym (*transcranial Direct Current Stimulation*, tDCS) zalicza się do nieinwazyjnych metod stymulacji mózgu. Jest to bezpieczna dla człowieka metoda, która pomimo długiej historii (Kropotov, 2006; Sarmiento i in., 2016), nadal zalicza się do metod eksperymentalnych (Budzisz, 2017; Kukuła i in., 2020; Pąchalska i in., 2020; Woods i in., 2016).

Już w starożytności Grecy używali ryb elektrycznych do leczenia migreny, a w XI wieku zaczęto leczyć epilepsję przy pomocy żywych sumów elektrycznych (Kellaway, 1946). Wymyślenie baterii umożliwiło systematyczne ocenianie i opisywanie klinicznych zastosowań stymulacji przewodzącej w leczeniu schorzeń neurologicznych i psychiatrycznych. Aldini w XVIII wieku zastosował stymulację elektryczną u pacjenta z dużą depresją i opisał, że prądy galwaniczne poprawiły jego nastrój (Parent, 2004). w XIX wieku i na początku XX wieku stymulacja prądem stałym była rutynowo stosowana w leczeniu zaburzeń psychicznych, ale ze względu na wiele niewiadomych dotyczących mechanizmów działania i brak wiarygodnych markerów neurofizjologicznych, co prowadziło do zmiennych i niespójnych wyników, od lat 30. XX wieku na pewien czas zaniechano jej stosowania (Wexler, 2017).

W latach 50. XX wieku prąd stały (głównie prądy impulsowe) pojawił się ponownie jako technika terapeutyczna służąca do wywoływania stanu zbliżonego do snu (Smith, 2008). Badania na zwierzętach w latach 60. XX wieku wykazały zdolność prądów stałych o niskim natężeniu do modulowania szybkości pracy neuronów i pobudliwości kory mózgowej (Bindman i in., 1964). Następnie od lat 70. XX wieku ponownie zaniechano stymulacji prądem stałym, prawdopodobnie z powodu rozwoju farmakoterapii i wprowadzenia nowych leków psychiatrycznych (Dubljević i in., 2014; Sarmiento i in., 2016).

Jako początek współczesnej przewodzącej stymulacji prądem stałym uważa się 1998 rok, kiedy Priori ze współpracownikami zbadali wpływ prądu stałego na mózg, testując jego oddziaływanie na pobudliwość kory mózgowej za pomocą przewodzącej stymulacji magnetycznej. Cechy charakterystyczne stymulacji stałoprądowej, takie jak fakt, że jest to metoda nieinwazyjna, w większości dobrze tolerowana i charakteryzująca się łagodnymi działaniami niepożądanymi, przyczyniły się do wzrostu zainteresowania tą metodą (Sarmiento i in., 2016). Oficjalny status regulacyjny dotyczący stosowania tDCS jest w trakcie

opracowywania w wielu krajach, np. Portugalii, Francji, Włoszech, Niemczech, Brazylii czy Stanach Zjednoczonych (Fregni i in., 2015; Lefaucheur i in., 2017; Vasquez i Fregni, 2021). w zależności od prawa obowiązującego w danym kraju oraz zaawansowania w wykorzystywaniu tDCS regulacje są różne. Przykładowo, dopuszczone do zastosowań klinicznych są zazwyczaj urządzenia zarejestrowane w danym kraju jako sprzęt medyczny. Stymulacja tDCS funkcjonuje obecnie jako metoda terapeutyczna w przypadku leczenia depresji i bólu. Standardowy protokół w leczeniu depresji zwykle ma następujący montaż: elektroda anodowa nad lewą grzbietowo-boczną korą przedczołową i katodowa nad prawą korą nadoczodołową, czyli odpowiednio: F3 i Fp2, zgodnie z system 10-20 EEG (Fregni i in., 2015). z kolei najczęstszy montaż przy leczeniu bólu obejmuje anodę w obszarze lewej kory ruchowej, a katodę nad prawą korą nadoczodołową. Zgodnie z systemem 10-20 EEG jest to odpowiednio C3 i Fp2 (DaSilva i in., 2011; Zhu i in., 2017).

Wiele ośrodków na całym świecie stosuje natomiast tDCS jako terapię badaną lub off-label (pozarejestracyjną) (Fregni i in., 2015). Zazwyczaj takie stosowanie stymulacji wymaga zgody odpowiedniej komisji etyki lub komisji bioetycznej.

Europejski Oddział Międzynarodowej Federacji Neurofizjologii Klinicznej (*European Chapter of the International Federation of Clinical Neurophysiology*; EC-IFCN) zlecił analizę stanu wiedzy opartej na dowodach naukowych na temat terapeutycznego zastosowania tDCS. Eksperti przeanalizowali doniesienia z badań naukowych opublikowanych do 2016 roku. Badania dotyczyły: bólu, choroby Parkinsona, innych zaburzeń ruchowych, udaru mózgu, afazji po udarze, stwardnienia rozsianego, epilepsji, zaburzeń świadomości, choroby Alzheimera, szumów usznych, depresji, schizofrenii oraz uzależnienia (Lefaucheur i in., 2017). Zebrane dane nie pozwoliły na wydanie rekomendacji na poziomie A (zdecydowana skuteczność) dla jakiegokolwiek z analizowanych wskazań. Rekomendacje na poziomie B (prawdopodobna skuteczność) proponuje się dla: 1. anodowej stymulacji lewej pierwotnej kory ruchowej (M1) i katodą w prawym obszarze orbitofrontalnym w fibromialgii; 2. anodowej stymulacji lewej grzbietowo-bocznej kory przedczołowej (DLPFC) i katodą w prawym obszarze orbitofrontalnym w dużym epizodzie depresyjnym bez lekooporności; 3. anodowej stymulacji prawej DLPFC i katodą w obszarze lewej DLPFC w uzależnieniach. Rekomendację poziomu C (możliwa skuteczność) proponuje się dla 1. anodowej stymulacji lewego M1 (lub kontralateralnego do strony bólu) z prawą katodą orbitofrontalną w przewlekłym bólu neuropatycznym kończyn dolnych, wtórnym do uszkodzenia rdzenia kręgowego. i odwrotnie, rekomendacja poziomu B (prawdopodobna nieskuteczność) jest przyznana w związku

z brakiem efektów klinicznych dla: 1. anodowej stymulacji lewej kory skroniowej i katodą w prawym obszarze orbitofrontalnym w szumach usznych; 2. anodowej stymulacji lewej DLPFC i katodą w prawym obszarze orbitofrontalnym w lekoopornym dużym epizodzie depresyjnym (Lefaucheur i in., 2017).

Analiza dotychczasowych doniesień z badań naukowych i klinicznych wskazuje, że stosowanie tDCS w ramach standardowych parametrów wiąże się z minimalnym ryzykiem (Fregni i in., 2015). Oznacza to, że nie wystąpiły żadne poważne zdarzenia niepożądane, że powszechne skutki uboczne, takie jak zaczerwienienie skóry, są łagodne i krótkotrwałe, oraz że w wyniku racjonalnych działań oceniających nie stwierdzono dowodów na uszkodzenie mózgu. Dotychczasowe standardowe parametry obejmują:

1. natężenie prądu mniejsze niż 2,5 mA;
2. prąd podawany przez elektrody, o których wiadomo, że minimalizują oparzenia skóry przy określonym natężeniu prądu;
3. czas stosowania prądu nie dłuższy niż 60 min na sesję;
4. sesje nie częstsze niż dwa razy dziennie (Fregni i in., 2015).

Warto zaznaczyć, że przekroczenie powyższych parametrów stymulacji nie oznacza, znacznego wzrostu ryzyka negatywnych skutków ubocznych, ale że doświadczenie z innymi parametrami stymulacji jest ograniczone. Zatem nie ma możliwości ostatecznego stwierdzenia maksymalnych granic bezpieczeństwa (Fregni i in., 2015).

Należy podkreślić, że tDCS jest złożoną i jak dotąd stosunkowo słabo poznaną metodą manipulowania fizycznymi właściwościami tkanki nerwowej. Etyka wymaga, aby badacz lub klinicysta miał aktualną wiedzę naukową na temat szybko rozwijającej się wiedzy w tym obszarze, tak aby jego badania lub praktyka kliniczna kierowały się nowymi dowodami dotyczącymi bezpieczeństwa i skuteczności, w miarę jak będą one dostępne (Fregni i in., 2015).

Stymulacja prądem stałym moduluje spontaniczną aktywność korową za pomocą prądu o niskim natężeniu, zazwyczaj o wartości 1–2 mA (Budzisz i in., 2017; Dedoncker i in., 2016; Woods i in., 2016). Takie oddziaływanie wywołuje zjawisko polaryzacji błon komórkowych neuronów, co w konsekwencji prowadzi do zwiększenia lub zmniejszenia poziomu wzbudzenia korowego mózgu (Budzisz i in., 2017; Fertoni i in., 2011; Philip i in., 2017; Yamada i Sumiyoshi, 2021).

Analizując dotychczasowe doniesienia z obszaru badań nad wykorzystaniem stymulacji tDCS oraz efekty, jakie można osiągnąć dzięki tej metodzie, można uznać, że jest to skuteczna, nieinwazyjna i tania metoda. Jednym z głównych atutów tDCS jest jej stosunkowo niska inwazyjność i bezpieczeństwo w porównaniu do innych technik stymulacji mózgu. Omawiana metoda jest stosunkowo łatwa do zastosowania w warunkach laboratoryjnych czy klinicznych. Jednak, mimo tych korzyści, istnieje wiele pytań, które wymagają dalszych badań. Na przykład, mechanizmy działania tDCS nie są w pełni zrozumiane. Ponadto, różne czynniki, takie jak indywidualne zróżnicowanie anatomiczne i funkcjonalne mózgu, mogą wpływać na skuteczność tDCS, co wymaga dalszych badań.

Podsumowując, stymulacja tDCS jest obiecującą metodą, godną uwagi. Jednak, aby w pełni wykorzystać jej potencjał, konieczne są dalsze badania.

1.2.1. Mechanizm działania

Podstawowe założenia prądowej stymulacji prądem stałym wywodzą się z dziedziny elektrotechniki. Stymulacja opiera się na prawie Ohma ($V = IR$), gdzie wzajemne oddziaływanie między napięciem (V), natężeniem (I) i oporem (R) tworzą podstawowe ramy koncepcyjne. Urządzenia tDCS dostarczają stały i predefiniowany prąd elektryczny (I ; mierzony w miliamperach i oznaczany skrótem mA) przez zazwyczaj dwie elektrody umieszczone na głowie. Natężenie prądu przepływającego między dwoma elektrodami jest równe różnicy potencjałów elektrycznych (V) podzielonej przez opór między elektrodami. Przewody urządzenia mają bardzo małą rezystancję, a główny opór pochodzi od elektrod i tkanki biologicznej, przez którą przepływa prąd. Prawo Ohma mówi, że aby prąd mógł przepływać przez przestrzeń o wysokim oporze, takie jak tkanka, konieczne jest wyższe napięcie. w związku z tym wyższy opór podczas tDCS prowadzący do wyższego napięcia może powodować dyskomfort na skórze głowy, w obszarze pod elektrodami, a nawet oparzenia (Budzisz, 2017; Liu i in., 2018; Truong i Bikson, 2018; Zandvakili i in., 2019).

Typowy system tDCS ma źródło zasilania połączone z dwoma zestawami elektrod: anodą (dodatnią), przez którą prąd elektryczny „wpływa” do miejsca stymulacji i katodą (ujemną), zwaną także elektrodą zwrotną, przez którą prąd elektryczny „wychodzi” z ciała. Ułożenie tych elektrod na skórze głowy (tzw. montaż) w przybliżeniu określa obszar mózgu, do którego dociera najwięcej energii elektrycznej pochodzącej ze stymulacji (Reinhart i in., 2017; Zandvakili i in., 2019). Początkowo kierowanie stymulacji odbywało się metodą prób i błędów. Od niedawna jest to ułatwione dzięki oprogramowaniu, które modeluje prąd

elektryczny. Takie modelowanie może być skomplikowane, ponieważ prąd elektryczny może przenikać przez skórę lub płyn mózgowo-rdzeniowy, a badania modelowe wykazały, że rozkład prądu może być odmienny u różnych osób, nawet jeśli montaż elektrod jest spójny, ze względu na cechy anatomiczne, takie jak grubość i budowa czaszki (Jiang i in., 2020; Opitz i in., 2015; Thair i in., 2017). Bardziej złożone montaże wykorzystują wiele elektrod (zwykle katod) w celu ukierunkowania stymulacji na konkretny obszar mózgu. Typowy zakres natężenia prądu stosowanego w tDCS wynosi od 0,1 mA do 4,0 mA, przy czym większość z nich mieści się w zakresie od 1 mA do 2 mA. Prąd ten jest zwykle stosowany przez kilkadziesiąt minut, zazwyczaj pojedyncza stymulacja trwa 10–60 min (Liu i in., 2018; Quiles i in., 2022; Yamada i Sumiyoshi, 2021; Zandvakili i in., 2019). Zazwyczaj cykl terapeutyczny obejmuje dziesięć codziennych sesji, a przerwa pomiędzy kolejnymi sesjami nie powinna być dłuższa niż dwa dni (Brunoni i in., 2012; Budzisz, 2017). Nie ma jednak konkretnych rekomendacji czy zaleceń dotyczących tego, ile spotkań w trakcie jednego cyklu powinno się odbyć.

Podsumowując, podstawowe założenia stymulacji prądem stałym tDCS opierają się na prawie Ohma, gdzie napięcie, natężenie prądu i opór tworzą podstawowe ramy koncepcyjne. Urządzenia tDCS dostarczają predefiniowany prąd elektryczny przez elektrody umieszczone na głowie, które wpływają na obszar mózgu. Opór wynikający z elektrod i tkanki biologicznej może prowadzić do dyskomfortu i potencjalnie oparzeń. Stymulacja tDCS obejmuje zwykle anodę (dodatnią) i katodę (ujemną), a ich rozmieszczenie określa obszar mózgu, który jest najbardziej stymulowany. Modelowanie prądu elektrycznego może być skomplikowane, ponieważ jego rozkład może się różnić między osobami ze względu na różnice anatomiczne. Typowy zakres natężenia prądu w tDCS wynosi od 0,1 mA do 4,0 mA, zazwyczaj stosuje się go przez kilkadziesiąt minut w pojedynczej sesji, a cykl terapeutyczny obejmuje dziesięć sesji. Nie ma jednak konkretnej rekomendacji dotyczącej liczby sesji w jednym cyklu.

1.2.2. Obszary zastosowania

Przeznaczona stymulacja prądem stałym oraz inne oddziaływania bazujące na dostarczaniu bodźca stałoprądowego, początkowo były wykorzystywane do stymulacji kory ruchowej (np. Bornheim i in., 2022; Creutzfeldt i in., 1962; Hummel i in., 2005; Lang i in., 2005; Nitsche i in., 2003; Santos Ferreira i in., 2019; Stagg i in., 2009). Natomiast ostatnie badania koncentrują się również na wpływie tDCS na inne obszary, takie jak grzbietowo-boczna kora przedczołowa (*dorsolateral prefrontal cortex*; DLPFC), co ma znaczenie

w leczeniu zaburzeń psychiatrycznych oraz modulowaniu zdolności poznawczych (Figeys i in., 2021; Kekic i in., 2016; Ruf i in., 2017; Yamada i Sumiyoshi, 2021; Zandvakili i in., 2019).

Obecne trendy związane z wykorzystaniem nieinwazyjnych metod stymulacji mózgu koncentrują się wokół trzech głównych obszarów. w dalszej części przedstawiono ich krótki opis.

Badanie fizjologii ludzkiego mózgu w odniesieniu do plastyczności i oscylacji (rytmów) mózgu. Nieinwazyjne techniki stymulacji mózgu są szeroko stosowane do badania fizjologii ośrodkowego układu nerwowego, identyfikacji funkcjonalnej roli określonych struktur mózgu, a także do badania dynamiki zmian w sieciach neuronalnych (Dayan i in., 2013). Systematycznie rośnie liczba badań z wykorzystaniem nieinwazyjnych metod stymulacji, co przekłada się na ich niekwestionowany wkład w neuronaukę. Badania nad poznawczymi i behawioralnymi konsekwencjami przezczaszkowej stymulacji prądem stałym wyprzedziły rozwój modeli komórkowych, które mogą wyjaśnić różnorodność zastosowań tDCS, zwłaszcza w kontekście unikalnych cech przestrzenno-czasowych, czyli trwałego przepływu słabego prądu stałego przez duże obszary mózgu. Specyficzne mechanizmy leżące u podstaw obserwowanych efektów behawioralnych i fizjologicznych, wywołanych stymulacją nie są jeszcze w pełni określone (Chan i in., 2021; Dayan i in., 2013; Staggs i in., 2018).

Oscylacje (rytmy) mózgu są okresową fluktuacją spowodowaną zmianami w pobudliwości grupy neuronów, która jest mierzona na skórze głowy jako różnice w napięciu (Dayan i in., 2013; Eggermont, 2021). Do tych pomiarów wykorzystuje się zazwyczaj takie techniki, jak elektroencefalografia (EEG) lub magnetencefalografia (MEG). Oscylacje są w stanie czasowo koordynować i kontrolować aktywność neuronów. Uważa się, że stanowią jedną z podstawowych zasad przetwarzania informacji w ludzkim mózgu (Başar i Düzgün, 2016; Buzsáki i Draguhn, 2004; Engel i in., 2001). Na przykład, oscylacje wolnofalowe pomiędzy korą nową a hipokampem podczas snu są ważne dla kształtowania się pamięci długotrwałej (Marshall i in., 2006). Badania łączące nieinwazyjne metody stymulacji mózgu i EEG wykazały, że stymulacja jest w stanie modulować oscylacje w zdrowym mózgu (Dayan i in., 2013). Przechczaszkowa stymulacja elektryczna (*transcranial electrical stimulation*, TES), w tym tDCS, jest wykorzystywana do modulowania potencjału błonowego neuronów i ich spontanicznej szybkości odpalania (*firing rates*) (Dayan i in., 2013; Nitsche i Paulus, 2000). w dotychczasowych badaniach stwierdzono, że podprogowe efekty na pojedynczym neuronie wywołane przez tDCS są kolektywnie wzmacniane na poziomie sieci neuronalnej i skutkują

zmianami w generowaniu potencjałów czynnościowych (Anastassiou i in., 2010; Chan i in., 2021; Dayan i in., 2013; Rahman i in., 2017).

Leczenie objawów klinicznych w chorobach neurologicznych i psychiatrycznych.

Stymulacja tDCS wykorzystywana jest również jako metoda wspomagająca leczenie w chorobach neurologicznych (Flöel, 2014) i psychiatrycznych (Kekic i in., 2016). w zakresie funkcji uwagi najczęściej terapii poddaje się takie jej aspekty, jak przeszukiwanie pola w poszukiwaniu bodźców istotnych, szybkość reakcji i podzielność (Rudroff i Workman, 2021; Sacco i in., 2016; Ulam i in., 2015; Yan i in., 2020). Badania wskazują, że zastosowanie tDCS oraz rehabilitacji poznawczej sprzyja utrwaleniu poprawy. Ponadto łączne zastosowanie tDCS i treningu kognitywnego przyczynia się do reorganizacji neuronalnej, zmniejszając wysiłek poznawczy pacjentów (Sacco i in., 2016; Ulam i in., 2015). Ustalono to na podstawie fMRI u pacjentów po urazie czaszkowo-mózgowym. Najczęstszy stosowany montaż, to F3 i F4 (Lefaucheur i in., 2017; Westwood i in., 2021).

Stymulacja tDCS jest również wykorzystywana w leczeniu afazji u pacjentów po udarze mózgu (Biou i in., 2019; Feil i in., 2019; Kukuła i in., 2020; Yun i in., 2015). Po zastosowaniu stymulacji tDCS u pacjentów z afazją po udarze mózgu obserwuje się: poprawę nazywania rzeczowników i czasowników (Fiori i in., 2019; Marangolo i in., 2013; Monti i in., 2008), skrócenie latencji odpowiedzi, poprawę płynności wypowiedzi (Soliman i in., 2021), poprawę w zakresie mowy funkcjonalnej (Cherney i in., 2021; Darkow i in., 2017). Niektóre badania wskazują, że uzyskana poprawa jest utrzymywana przez dłuższy czas – nawet pięć miesięcy po stymulacji (Vestito i in., 2014). u osób otrzymujących aktywną stymulację, w porównaniu z osobami otrzymującymi stymulację-placebo, odnotowano większą poprawę w standaryzowanych ocenach językowych, które obejmują wszystkie modalności językowe, tj.: rozumienie ze słuchu, ekspresja ustna, rozumienie czytania i pisanie (Cherney i in., 2021). Najczęściej stosowane montaże to: F5 i F6 (obszary Broki) lub Cp5 i Cp6 (obszary Wernickego) (Lefaucheur i in., 2017).

W stymulacji funkcji wykonawczych występuje poprawa wyników w testach kontroli impulsów, pamięci roboczej, fonemowej płynności słownej i uwagi. Dokładny mechanizm tego efektu nie jest jasny, ale wykazano zmiany stężenia neuroprzekaźników w miejscach stymulacji i rozległe zmiany perfuzji. Najczęściej stosowany jest montaż: F3 i F4 lub F3 i Fp2 (Clark i in., 2021; Doruk i in., 2014; Hsu i in., 2011; Rudroff i Workman, 2021; Yun i in., 2015).

Badanie wpływu fizjologii mózgu na procesy poznawcze. w licznych badaniach wykazano, że tDCS poprawia zdolności poznawcze zarówno u osób zdrowych, jak i z zaburzeniami neurologicznymi i psychiatrycznymi. (Chan i in., 2021; Schroeder i Plewnia, 2017). Stymulacja prądem stałym przynosi ogólnie korzystne efekty, jednocześnie jednak istnieje szereg niejednoznacznych kwestii, które stanowią obszar badań. Pierwszą kwestią jest duża zmienność między- i wewnątrzosobnicza w odpowiedzi na protokoły stymulacji (Evans i in., 2022; Krause i Cohen Kadosh, 2014; Summers i in., 2016; Wiethoff i in., 2014). Zidentyfikowano szereg czynników, które mogą przyczyniać się do dużej zmienności indywidualnych odpowiedzi. Po pierwsze, czynnikami wydają się różnice osobnicze w anatomii i fizjologii oraz poziomie pobudzenia układu w momencie stymulacji (*state-dependency*) (Kim i in., 2014; Opitz i in., 2015; Summers i in., 2016). Badania z wykorzystaniem obrazowania i modelowania obliczeniowego ujawniły duże międzyosobnicze różnice w polach elektrycznych indukowanych przez tDCS, wynikające z różnic w grubości czaszki i rozkładu/ilości płynu mózgowo-rdzeniowego (Kim i in., 2014; Opitz i in., 2015). Zatem ten sam montaż elektrod może stymulować inne obszary mózgu u różnych osób. Różnice morfologiczne powodują lokalne fluktuacje w drodze prądu (Hannah i in., 2019; Rawji i in., 2018). Co istotne, w jednym z badań odnotowano, że osoby w wieku 60 lat mogą mieć o 30% słabsze średnie pole elektryczne niż 20-latkowie (Laakso i in., 2015).

Niemniej, badania z wykorzystaniem tDCS dostarczają informacji na temat procesów poznawczych oraz ich powiązań z różnymi obszarami kory mózgowej (Filmer i in., 2014; Marshall i in., 2006). Dane z metaanalizy (Chan i in., 2021) wskazują, że stymulacja tDCS z anodą umieszczoną nad bocznymi obszarami przedczołowymi zwiększa aktywność brzusznej sieci uwagowej (*ventral attention network*, VAN) w spoczynku. Obszar ten odpowiada głównie za przekierowywanie uwagi na istotne bodźce. Zwiększenie aktywności VAN może oznaczać zwiększoną zdolność do uczestniczenia w nadchodzących zadaniach, co skutkuje poprawą wykonania zadania. Odnosi się to zwłaszcza do wymagających problemów poznawczych, takich jak zadania pamięci roboczej o dużym obciążeniu poznawczym (Brunoni i Vanderhasselt, 2014). w zakresie funkcji wykonawczych stymulacja anodowa nad grzbietowo-boczną korą przedczołową (*dorsolateral prefrontal cortex*, DLPFC) może zmniejszyć czasy reakcji zdrowych osób dorosłych zaangażowanych w różne zadania funkcji wykonawczych (Dedoncker i in., 2016). Przeprowadzona przez Dedoncker z zespołem (2016) metaanaliza 61 badań z jedną sesją stymulacji wykazała, że po anodowej stymulacji tDCS, uczestnicy odpowiadają szybciej i dokładniej na zadania poznawcze. w badaniach osób

starszych okazało się, że tDCS może poprawić podstawowe funkcjonowanie poznawcze i językowe (Summers i in., 2016), a także poprzez poprawę wydajności pamięci roboczej może usprawnić związany z wiekiem spadek poznawczy do poziomu porównywalnego z młodszymi uczestnikami (Meinzer i in., 2013).

1.2.3. Metoda tDCS a plastyczność mózgu

Metoda tDCS bazuje na zjawisku plastyczności mózgu (neuroplastyczności). Pojęcie to odnosi się do cechy układu nerwowego, która zapewnia zdolność do zmienności, adaptacji do zmieniających się warunków środowiskowych, a także do uczenia się i pamięci. Ponadto dzięki neuroplastyczności komórki nerwowe mózgu przejawiają zdolność do regeneracji i tworzenia nowych sieci połączeń z innymi neuronami (Hutson i Di Giovanni, 2019; Lindenberger i Lövdén, 2019). Zjawisko neuroplastyczności funkcjonuje również w dorosłym mózgu, jednak te procesy nie są tak intensywne, jak w mózgu rozwijającym się (Kossut, 2019; Lindenberger i Lövdén, 2019; Lövdén i in., 2020; Pąchalska i in., 2020). Potencjał plastyczności mózgu musi być stale kontrolowany przez mechanizmy podtrzymujące stabilność (Hensch, 2005). Ostatnie badania zaczęły identyfikować mechanizmy molekularne, które sprzyjają stabilności lub plastyczności. Dynamiczne współdziałanie tych mechanizmów organizuje rozwój behawioralny w naprzemienne, sekwencyjnie uporządkowane okresy plastyczności i stabilności, które umożliwiają hierarchiczną organizację funkcji mózgowych i poznania wyższego rzędu. Jednym z koronnych przykładów jest sekwencja okresów wrażliwości, która napędza rozwój sensoryczny i poznawczy od niemowlęctwa do wieku młodzieńczego. Według Henscha (2005) oraz Takesiana i Henscha (2013) plastyczność w późniejszych okresach życia, w tym w dorosłości i starości, jest prawdopodobnie regulowana przez podobne mechanizmy molekularne jak te, które regulują otwieranie i zamykanie okresów wrażliwych we wczesnej ontogenezie (Lindenberger i Lövdén, 2019).

Zgodnie z aktualnymi doniesieniami zakłada się, że wielokrotna stymulacja mózgu prowadzi do trwałych zmian w funkcjonowaniu człowieka (Kuo i in., 2018; Samani i in., 2019; Venkatakrisnan i Sandrini, 2012). Uważa się, że długotrwała plastyczność synaptyczna stanowi neurofizjologiczną podstawę uczenia się i pamięci (Changeux i Dehaene, 1989; Hebb, 2005; Malinow i Malenka, 2002; Takeuchi i in., 2014). Przypuszczalnie paradygmaty treningowe u ludzi wpływają na uczenie się poprzez indukowanie plastyczności (Draganski i May, 2008; Kronberg i in., 2017).

Ze względu na behawioralny wpływ tDCS na poprawę zdolności poznawczych, badacze wysunęli hipotezę, że tDCS może modulować długotrwałe wzmocnienie synaptyczne (*long-term potentiation*, LTP) oraz długotrwałą depresję synaptyczną (*long-term depression*, LTD). Są to najbardziej zbadane modele długotrwałej plastyczności synaptycznej (Brasil-Neto, 2012; Collingridge i Bliss, 1987). Przez pojęcie LTP rozumiany jest proces, w którym połączenia synaptyczne między neuronami stają się silniejsze przy częstej aktywacji. Uważa się, że LTP jest sposobem, w jaki mózg zmienia się w odpowiedzi na doświadczenie, a zatem może być mechanizmem leżącym u podstaw uczenia się i pamięci. Aby wzmocnienie synaptyczne było użyteczne, inne procesy muszą selektywnie osłabiać określone zestawy synaps. Takim procesem jest LTD. Polega on na trwałym, zależnym od aktywności zmniejszeniu skuteczności synaptycznej, które zwykle występuje po powtarzającej się stymulacji dośrodkowej o małej częstotliwości (Braunewell i Manahan-Vaughan, 2001; Connor i Wang, 2016; Ito, 1989).

Chociaż dokładne mechanizmy leżące u podstaw efektów terapeutycznych przezczaszkowej stymulacji prądem stałym (tDCS) nadal nie zostały w pełni poznane (Mohammadi, 2016), to ostatnie badania podkreślają potencjał tej metody do poprawy neuroplastyczności (Ghanavati i in., 2022; Radman i in., 2009). Wykazano, że anodowa stymulacja tDCS zwiększa pobudliwość i powoduje depolaryzację spoczynkowego potencjału błonowego, co zwiększa pobudliwość neuronów i umożliwia bardziej spontaniczne odpalanie komórek, natomiast katodowa stymulacja tDCS zmniejsza ją i powoduje hiperpolaryzację spoczynkowego potencjału błonowego (Nitsche i Paulus, 2000). Pomimo że dokładne mechanizmy leżące u podstaw efektów terapeutycznych tDCS nadal nie zostały do końca poznane, badacze proponują, że anodalna tDCS indukuje plastyczność podobną do długotrwałego wzmocnienia synaptycznego (LTP) i długotrwałej depresji synaptycznej (LTD) (Ghanavati i in., 2022; Nitsche i in., 2008; Radman i in., 2009). Badania wskazują, że nieinwazyjna stymulacja mózgu może powodować zmiany w hamujących układach GABAergicznym (kwas gamma-aminomasłowy), które odgrywają krytyczną rolę w poprawie neuroplastyczności (Nitsche i in., 2003). Ponadto spektroskopia rezonansu magnetycznego wykazała, że anodowa stymulacja tDCS zmniejsza stężenie GABA (Stagg i in., 2009). z kolei Fritsch i współpracownicy (2010) wykazali na myszach, że anodowa stymulacja tDCS aplikowana do kory motorycznej (M1) indukuje długotrwałe wzmocnienie, które jest specyficzne dla biegunowości, zależne od receptora NMDA i wymaga sprzężenia stymulacji z powtarzalną aktywacją synaptyczną o niskiej częstotliwości (LFS). Takie oddziaływanie zwiększa wydzielanie czynnika neurotroficznego pochodzenia mózgowego (*Brain-Derived*

Neurotrophic Factor; BDNF) i aktywuje kinazę receptorową B (TrkB). Wyniki te sugerują, że BDNF jest kluczowym mediatorem efektów następczych wywołanych przez tDCS. Inne ważne doniesienia w tym zakresie mówią, że anodowa stymulacja tDCS ukierunkowana na lewy obszar grzbietowo-boczną korę przedczołową (o natężenie prądu 2 mA) poprawia wydajność pamięci operacyjnej, będącej składową funkcji wykonawczych (Fregni i in., 2005; Iyer i in., 2005).

Pomimo coraz częstszego stosowania tDCS w sytuacjach eksperymentalnych i klinicznych, nadal pozostaje wiele otwartych pytań dotyczących szczegółowych mechanizmów i funkcji tDCS; głównie w zakresie neurochemicznych i genomowych efektów stymulacji tDCS w mózgu. Niemniej jednak, aby określić dokładny mechanizm działania tDCS, konieczne jest przeprowadzenie dalszych badań komórkowych i molekularnych (Mohammadi, 2016).

1.3. Wpływ przeczaszkowej stymulacji prądem stałym na funkcjonowanie poznawcze u osób zdrowych

Jednym z zastosowań tDCS jest wzmocnienie funkcji poznawczych (Flöel, 2014), definiowanych w ogólnym rozumieniu jako poprawa wyników związanych z wykonywanymi zadaniami poznawczymi (Dubljević i in., 2015), ma to zastosowanie zarówno u osób zdrowych, jak i w populacjach klinicznych.

Stosowanie przeczaszkowej stymulacji prądem stałym w celu poprawy funkcjonowania poznawczego w ostatnich latach zyskało na popularności. Stymulacja tDCS, poprzez dostarczanie do kory mózgowej słabego polaryzującego prądu, przyczynia się do modulowania wzbudzenia korowego, a to z kolei wpływa na zmianę wskaźników poznawczych (Polanowska i Seniów, 2010). Dotychczasowe badania wskazują na poprawę funkcjonowania poznawczego związaną ze stosowaniem przeczaszkowej stymulacji prądem stałym wśród osób zdrowych głównie w zakresie: pamięci operacyjnej, pamięci długotrwałej, uwagi, zdolności uczenia się czy podejmowanie decyzji, a także kontroli poznawczej i funkcji językowych (np. Boudewyn i in., 2020; Flöel, 2014; Hauser i in., 2013; Hoy i in., 2013; Imburgio i Orr, 2018; Javadi i Cheng, 2013; Minati i in., 2012; Ohn i in., 2008; Roy i in., 2015; Ruf i in., 2017).

W tabeli 1 przedstawiono przegląd badań, dotyczących wpływu tDCS na funkcjonowanie poznawcze. Przeszukując bazy danych, uwzględniono następujące kryteria: 1) publikacje w języku angielskim i polskim; 2) badania oryginalne w czasopismach recenzowanych; 3) badania przeprowadzone w grupie osób zdrowych; 4) badania obejmujące osoby od 18 roku życia.

Tabela 1

Przegląd wyników badań dotyczących tDCS i funkcjonowania poznawczego

Badanie	Grupa badana	Badane funkcje	Narzędzia	Schemat stymulacji	Wyniki	Inne
Antal i in., 2004	$N = 10$ osób (M: 9); wiek: $M = 26,08$; $SD = 10,9$.	Koordynacja wzrokowo-ruchowa	komputerowe zadanie koordynacji wzrokowo-ruchowej	Obszar skroniowy środkowy (<i>middle temporal</i> , MT)	Zmniejszenie pobudliwości wywołane stymulacją katodową poprawiało percepcję kierunku spójnego ruchu przez badanego tylko wtedy, gdy był on prezentowany wśród przypadkowych kropek (percepcja ruchu złożonego), a pogarszało ją, gdy prezentowany był tylko jeden kierunek ruchu (percepcja ruchu prostego)	Brak dokładnych danych na temat grupy badanej oraz schematu stymulacji
Iyer i in., 2005	$N = 43$ zdrowe praworęczne osoby; wiek: $M = 37,5$; $SD = 12,9$; lata edukacji ≥ 12	Fluencja słowna; uwaga; czas reakcji; pamięć; szybkość psychomotoryczna	Test fluencji słownej (<i>Verbal Fluency Test</i>); skrócona wersja <i>CALCAP California Computerized Assessment Package; the Grooved Pegboard Test</i>	1 mA lub 2 mA; 20 min; elektroda aktywna: F3, elektroda odniesienia: Fp2	Przy 2 mA, anoda F3: fluencja słowna uległa znaczącej poprawie, przy katodzie F3 – łagodnemu zmniejszeniu. Nie stwierdzono istotnych klinicznie efektów w pozostałych pomiarach	Jednokrotna stymulacja
Fregni i in., 2005	$N = 15$ (M: 4); wiek $M = 20,2$ lat; praworęczne zdrowe osoby Badanie po 6 mies.: $n = 7$	Pamięć operacyjna	test n-back	1 mA, 10 min 1. anoda: F3, katoda: Fp2 2. sham	Znacząco więcej poprawnych odpowiedzi podczas aktywnej stymulacji w porównaniu z sham Brak zmian przy stymulacji katodowej	Wg autorów pierwsze badanie, oceniające wpływ tDCS na pamięć operacyjną

Badanie	Grupa badana	Badane funkcje	Narzędzia	Schemat stymulacji	Wyniki	Inne
				Po 6 mies.: 1. anoda Fp2, katoda: F3 2. anoda: C3, katoda: Fp2 3. sham gąbeczki 35 cm ²		Mała grupa badanych. Jedna stymulacja
Flöel i in., 2008	Osoby zdrowe; $N = 19$ (M: 10); wiek: $M = 25,6$ (SD = 2,7)	Uczenie się językowe; czas reakcji	komputerowa wersja zadania uczenia się asocjacyjnego	1 mA; 20 min; każda osoba 3 sesje: 1. anodowa 2. katodowa 3. sham Elektroda aktywna: Cp5; odniesienia: Fp2 Odstęp między sesjami: min. 7 dni; elektrody: 5 × 7 cm	Znacząca poprawa przyswajania nowego słownictwa przy stymulacji anodowej. Czas reakcji nie różnił się pomiędzy stymulacją anodową, katodową i pozorowaną	Pojedyncza stymulacja
Dockery i in., 2009	Zdrowe osoby praworęczne; $N = 24$ (M: 5); wiek: $M = 24$ lata (SD = 3,16); lata edukacji: $M = 16,8$ (SD = 2,63)	Planowanie	Wersja komputerowa <i>Tower of London</i>	1 mA; 15 min; każda osoba po jednej sesji w każdym montażu: 1. anoda: F3, katoda: Fp2 2. anoda: Fp2, katoda: F3 3. sham; po 6 i 10 mies. – re-test z sham Gąbeczki 35 cm ²	Istotna poprawa w zakresie planowania (czas reakcji i liczba ruchów). Katodalny tDCS poprawił wydajność we wczesnej fazie uczenia się, kiedy uczestnicy najgorzej radzą sobie z zadaniem. Anodalny tDCS zwiększył wydajność w fazie późnego uczenia się, kiedy uczestnicy są już na ogół wprawieni w wykonywaniu zadań. Katodowy tDCS wydaje się działać jako neuronalna redukcja szumu lub filtr,	Jednokrotna stymulacja w danym montażu

Badanie	Grupa badana	Badane funkcje	Narzędzia	Schemat stymulacji	Wyniki	Inne
					ułatwiają nabywanie funkcji wykonawczych związanych z wykonywaniem TOL. Anodalny tDCS wydaje się zapewniać korzyści w warunkach już wytrenowanych, ale nie podczas ekspozycji na nowe zadanie. Wpływ anodального tDCS jest widoczny przy wyższych poziomach obciążenia zadaniami	
Cerruti i Schlaug, 2009	Zdrowe osoby praworęczne; $N = 18$ (M: 5); wiek: $M = 25,5$ lat ($SD = 2,60$)	Fluencja słowna, funkcje językowe, funkcje wykonawcze	zmodyfikowany Test Fluencji Słownej; zmodyfikowany Test Odległych Skojarzeń (<i>Remote Associates Test</i> , RAT)	1 mA, 20 min, 1. anoda: F3, katoda: Fp2 2. katoda F3, anoda Fp1 3. sham; gąbeczki 16,3 cm ²	Anodowa stymulacja F3 poprawia wykonanie RAT	Całość badania odbywała się w trakcie jednego trzygodzinnego spotkania
Fertonani i in., 2010	1: Zdrowe osoby; $N = 12$ (M: 4); wiek $M = 24,1$ lata ($SD = 3,7$) 2: Zdrowe osoby; $N = 12$ (M: 6); wiek $M = 21,8$ lat ($SD = 1,0$) 12 innych zdrowych	Dokładność nazywania; szybkość reakcji	obrazkowy test nazywania; uważności	2 mA; 8 min lub 10 min; anoda: F3, katoda: ramię vs katoda: F3, anoda: ramię vs sham	Anodowa stymulacja F3 poprawia nazywanie. Brak efektów przy stymulacji katodowej	Eksperyment 1: 3 stymulacje (anodowa, katoda i sham) jednego dnia; godzinna przerwa między nimi Eksperyment 2: stymulacje aktywne w dwóch różnych dniach

Badanie	Grupa badana	Badane funkcje	Narzędzia	Schemat stymulacji	Wyniki	Inne
Zachle i in., 2011	Studenci; $N = 16$ ($M = 6$); wiek: $M = 25$ ($SD = 2$) Grupa kontrolna: $N=16$ ($M = 4$); wiek: $M=24$ ($SD=4$)	Pamięć operacyjna	test n-back; qEEG	1 mA, 15 min; F3: anoda vs katoda vs sham	tDCS może zmieniać zorganizowaną aktywność korową związaną z pamięcią roboczą oraz modulować wydajność pamięci roboczej. Anodowa stymulacja zwiększyła, a katodowa zmniejszyła moc oscylacji związanych z wydarzeniami w zakresie theta i alfa	Brak danych o elektrodzie odniesienia
Keeser i in., 2011	Zdrowe osoby, $N = 10$ ($M = 5$); wiek: $M = 28,89$ lat ($SD = 2.6$)	Pamięć robocza	test n-back; EEG	2 mA; 20 min; anoda: F3; katoda: Fp2 vs sham	Aktywna stymulacja: skrócenie czasu reakcji, zwiększenie dokładności	Pojedyncza sesja aktywnej stymulacji i sham. Przerwa między stymulacjami: pięć dni
Boehringer i in., 2013	Osoby zdrowe praworęczne, $N = 40$ ($M = 20$); wiek: $M = 25$ ($SD = 3$)	Wербalna pamięć operacyjna	powtarzanie cyfr; czytanie kolorowych słów (Test Stroopa); n-back; test tappingu (<i>Finger Tapping Test</i> – FTT)	2 mA; 25 min; elektrody: anoda: prawy mięsień policzka katoda: 2 cm poniżej inionu i 1 cm za prawym wyrostkiem sutkowym; elektrody: 5×5 cm	Stymulacja katodowa zablokowała powtarzania cyfr wprost w porównaniu z grupami sham W grupie sham poprawa w powtarzaniu cyfr wspak	Pojedyncza sesja Sprawdzano blokujący wpływ stymulacji katodowej na pamięć operacyjną
Hauser i in., 2013	Osoby zdrowe praworęczne, $N = 21$ ($M = 10$); wiek: $M = 22,8$ ($SD = 3,1$)	Przetwarzanie wielkości liczbowych i arytmetyka umysłowa	zadanie porównywania liczb i odejmowania	1 mA; 25 min; elektrody: 1. anoda: P3, katoda: Fp2	Lewostronna anodowa stymulacja znacząco poprawiła wydajność w zadaniu porównywania liczb i odejmowania, podczas gdy dwustronna i prawostronna anodowa	Każda osoba uczestniczyła jednokrotnie w każdym montażu elektrod

Badanie	Grupa badana	Badane funkcje	Narzędzia	Schemat stymulacji	Wyniki	Inne
				2. anoda: P4, katoda Fp1 3. bilateralna: anody P3 i P4, katody: Fp1 i Fp2 4. bilateralna: katody: P3 i P4; anoda: Fp2 i Fp1 5. sham	stymulacja nie spowodowała żadnej poprawy w porównaniu z shamem Jednoczesna stymulacja obu półkul nie doprowadziła do wyraźniejszych efektów	Minimalna przerwa między sesjami wynosiła 24 godz.
Hoy i in., 2013	Osoby zdrowe, $N = 18$ (M: 7); wiek: $M = 24,71$ (SD = 6,97)	Pamięć operacyjna; czas reakcji	test n-back; pomiar EEG	1 mA vs 2 mA vs sham; 20 min anoda: F3; katoda: Fp2; elektrody: 35 cm ²	Stwierdzono znaczącą poprawę czasu reakcji zarówno po stymulacji 1 mA, jak i 2 mA, przy braku istotnych zmian w czasie po stymulacji sham. Szybciej efekty były widoczne przy stymulacji 1 mA niż 2 mA Nie stwierdzono wpływu tDCS na neurofizjologiczną odpowiedź na prawidłowe odpowiedzi w teście 3-back; ERS theta zmniejszała się w czasie, a ERD alfa zwiększała się w czasie niezależnie od warunków stymulacji	Badacze sugerują, że czas reakcji okazał się bardziej czułą miarą wydajności WM w porównaniu z dokładnością. Tylko jedna sesja. Trzykrotny pomiar: bezpośrednio po stymulacji, po 20 min i po 40 min
Javadi i Cheng, 2013	Osoby zdrowe, $N = 15$	Rekonsolidacja długoterminowej pamięci werbalnej	zapamiętywanie listy 120 słów	1,5 mA; 20 min; 1. anoda: F3, katoda: Fp2 2. katoda: F3, anoda: Fp2 3. sham	Anodalna tDCS podczas drugiej sesji (3 godz. po uczeniu się) skutkowała istotnie większą liczbą słów rozpoznanych w trzeciej sesji (5 godz. po uczeniu się) w porównaniu ze stymulacją katodalną i sham. Katodalna tDCS nie miała wpływu na	

Badanie	Grupa badana	Badane funkcje	Narzędzia	Schemat stymulacji	Wyniki	Inne
				elektrody: 3,5 × 3,5 cm (aktywna), 5,5 × 5,5 cm (odniesienia)	wyniki rozpoznawania w porównaniu ze stymulacją sham	
Zmigrod i in., 2016	Studenci, $N = 14$ ($M = 6$); wiek: $M = 20$ lat (przedział: 18–24 lata)	Czas reakcji; poprawność reakcji	Go/No Go	2 mA; 20 min 1. anoda: F4, katoda: Fp1 2. katoda: F4, anoda: Fp1 3. sham	Anodowa stymulacja poprawia czas reakcji i poprawność odpowiedzi Katodowa stymulacja nad prawą DLPFC wydaje się utrudniać hamującą modulację przetwarzania sensorycznego	Każda osoba uczestniczyła jednokrotnie w każdym montażu elektrod Minimalna przerwa między sesjami wynosiła 24 godz.
Au i in., 2016	Zdrowe osoby praworęczne, $N = 62$ ($M = 24$); wiek: 18–35 lat 1. anoda lewa: $n = 20$; wiek: $M = 20,91 \pm 2,34$ lata 2. anoda prawa: $n = 20$; wiek: $M = 21,55 \pm 2,86$ lata 3. sham: $n = 22$; wiek: $M = 20,52 \pm 1,93$ lata	Pamięć operacyjna	test n-back; Powtarzanie Cyfr; <i>The Block-tapping task</i>	2 mA; 25 min 1. anoda: F3, katoda Fp2 2. anoda: F4, katoda Fp1 3. sham 7 spotkań; elektrody: 5 × 7 cm	Znacząca poprawa w n-back w grupie aktywnej, mniejsza poprawa w the Block-tapping task, brak różnic w post-tescie w powtarzaniu cyfr Stymulacja prawostronna: większa poprawa w n-back i the block-tapping task Stymulacja lewostronna: większa poprawa w powtarzaniu cyfr Lepsze efekty, gdy była przerwa na weekend (bez stymulacji)	
Ruf i in., 2017	Osoby zdrowe, $N = 71$ ($M = 14$); wiek $M = 24,45$ ($SD = 5,16$) 1. trening zbieżny: $n = 24$ ($M = 6$)	Pamięć operacyjna werbalna i wzrokowo-przestrzenna	test n-back	1 mA; 20 min anoda: F3 lub F4; katoda: mięsień naramienny elektrody: 5 × 7 cm 3 sesje każda osoba	W porównaniu ze stymulacją sham bardziej stroma krzywa uczenia się, gdy trening pamięci operacyjnej był połączony z tDCS zgodnie z zadaniem. Ta przewaga była również obecna w porównaniu	

Badanie	Grupa badana	Badane funkcje	Narzędzia	Schemat stymulacji	Wyniki	Inne
	2. trening niezbieżny: $n = 24$ (M: 3) 3.sham: $n = 23$ (M: 5)				z tDCS niezgodnym z zadaniem. Efekty te utrzymywały się przez okres do dziewięciu miesięcy i przenosiły się na odpowiednie, niećwiczone zadanie. Te długotrwałe, przenoszone i specyficzne dla zadania efekty pokazują behawioralnie istotne i trwałe ułatwienie procesów neuroplastycznych przez tDCS, które można wykorzystać w leczeniu zaburzeń związanych z deficytem pamięci operacyjnej	
Friehs i Frings, 2019	Zdrowe osoby, $N = 63$ (M: 20) 1. anoda online: wiek $M = 23,76 \pm 2,72$ 2. anoda offline: $M = 24,62 \pm 2,31$ 3. sham $M = 24,10 \pm 2,88$	Pamięć operacyjna	test n-back	0,5 mA; 20 min 1. anoda: F3, katoda: lewy mięsień naramienny 2. anoda; F3, katoda: lewy mięsień naramienny	Poprawa w czasie reakcji prawidłowej i w trafności po stymulacji offline. Wybiórcza poprawa dokładności dla bodźców docelowych	Pre-test i post-test były wykonywane tego samego dnia. Tylko jedna sesja stymulacji
Luque-Casado i in., 2019	Zdrowe osoby, $N = 30$ (M: 23); wiek: $M = 21,6$ (SD = 2,7)	Pamięć operacyjna	Powtarzanie cyfr wspak	1,5 mA; 15 min Każda osoba dwie sesje: 1. anoda: F3, katoda: Fp2 2. sham Elektrody: 35 cm ²	Brak poprawy w zakresie pamięci operacyjnej po pojedynczej sesji anodowej stymulacji tDCS nad lewą DLPFC	Jedna sesja. Pomiar zdolności powtarzania cyfr wspak wykonany dwukrotnie: bezpośrednio po stymulacji i po 10 min

Badanie	Grupa badana	Badane funkcje	Narzędzia	Schemat stymulacji	Wyniki	Inne
Framorando i in., 2021	Zdrowe osoby, $N = 17$ (M: 7); wiek: $M = 21,82$ (SD = 0,47)	Pamięć operacyjna	test n-back; pomiar fizjologiczny układu sercowo-naczyniowego	1 mA; 11 min 3 różne sesje, oddzielone jednotygodniową przerwą: 1. anoda: F3, katoda: Fp2 2. katoda: F3, anoda: Fp2 3. sham Elektrody: 5×5 cm	Anodalna stymulacja DLPFC moduluje wysiłek w trudnym zadaniu pamięci operacyjnej Nie zaobserwowano znaczącego wpływu na czasy reakcji i dokładność odpowiedzi	
Karthikeyan i in., 2021	Osoby zdrowe, $N = 32$ (M: 16); przedział wiekowy: 18–34 lata	Pamięć operacyjna	test n-back	1 mA; 10 min; 1. anoda: F3, katoda: Fp2 2. sham	Anodalna tDCS znacząco poprawiła WM w stosunku do sham tDCS i kontroli u obu płci. Korzyści te utrzymywały się poza okresem stymulacji i były unikalne we wszystkich miarach wydajności. Nie zaobserwowano jednak żadnych zmian w subiektywnym wysiłku lub poziomie zmęczenia pomiędzy warunkami, chociaż uczestnicy zgłaszali większy dyskomfort podczas stymulacji	Każda osoba uczestniczyła jednokrotnie w każdym montażu elektrod
Maheux-Caron i in., 2021	Osoby zdrowe, $N = 34$;	Pamięć operacyjna, również w warunkach stresowych	test n-back	2 mA; 20 min; 1. anoda: F3 2. sham	Aktywna stymulacja zmniejszyła szkodliwy wpływ stresu na pamięć roboczą, w porównaniu z warunkami sham. Wyniki te potwierdzają wniosek, że stymulacja dIPFC może moderować wpływ stresu na pamięć roboczą. Wyniki dostarczają również dodatkowych dowodów na to,	Każda osoba brała udział w dwóch sesjach: aktywnej i sham

Badanie	Grupa badana	Badane funkcje	Narzędzia	Schemat stymulacji	Wyniki	Inne	
					że stymulacja tDCS regionów przedczołowych może wpływać na procesy poznawcze wyższego rzędu		
Coulborn i Fernández-Espejo, 2022	$N = 26$ (M: 10); wiek: $M = 24,50$ lat ($SD = 3,56$)	Czas reakcji, poprawność uwagi	reakcji, reakcji, podtrzymywania uwagi na odpowiedzi (SART); thought probe; fMRI	Zadanie podtrzymywania uwagi na odpowiedzi (SART); thought probe; fMRI	1,8 mA; 20 min; 1. anoda: F3, katoda: Fp2; 2. sham	Brak wpływu anodowej tDCS na lewą DLPFC w modulacji utrzymywania uwagi	Każda osoba brała udział w dwóch sesjach: aktywnej i sham
Abul Hasan i in., 2023	Osoby zdrowe; $N = 40$ (M: 22); wiek: $M = 22$ ($SD = 1,5$) 1. aktywna: $n = 21$ 2. sham: $n = 19$	Funkcje wykonawcze (pamięć operacyjna, interferencja)	test n-back; test Stroopa; EEG	test 2 mA Anoda: F3 Katoda: F4	Znaczący wzrost aktywności w paśmie theta, alfa i beta w DLPFC, korze zakrętu obręczy i ciemieniowej. Badanie to dostarcza dowodów na to, że tDCS może być stosowany do zwiększania wydajności funkcji wykonawczych u osób zdrowych		

Adnotacja. M – mężczyzna; stymulacja online: testy/zadania wykonywane w trakcie stymulacji; stymulacja offline: testy/zadania wykonywane po stymulacji; sham – stymulacja nieaktywna, pozorowana, placebo; DLPFC – grzbietowo-boczna kora przedczołowa.

Źródło: opracowanie własne.

W tabeli 1 zaprezentowano przegląd badań dotyczących stymulacji tDCS oraz funkcjonowania poznawczego w grupie zdrowych osób. Pierwsze badanie dotyczące wpływu tDCS na funkcjonowanie poznawcze, dostępne po przeszukaniu baz MEDLINE, ERIC i EBSCO, pochodzi z 2004 roku (Antal i in., 2004). Na uwagę zasługuje fakt, że nie ma konkretnych danych dotyczących schematu stymulacji. Niemniej zaobserwowano poprawę w zakresie wybranych funkcji percepcyjnych. Przedstawione badania obejmują od 10 osób badanych (Antal i in., 2004; Kessler i in., 2012), przez kilkanaście (Framorando i in., 2021; Hoy i in., 2013), do kilkudziesięciu osób. Najwięcej osób uczestniczyło w badaniu przeprowadzonym przez Ruf i współpracowników (2017), tj. 71 osób. w dalszej kolejności, w zakresie liczebności próby, są Friehs i Frings (2019), którzy zbadali 63 osoby oraz Au ze współpracownikami (2016) z grupą 62 osób.

W zdecydowanej większości badań uczestnicy brali udział tylko w jednej sesji stymulacji (np. Boehringer i in., 2013; Friehs i Frings, 2019; Hoy i in., 2013; Luque-Casado i in., 2019) lub byli poddawani stymulacji w różnych montażach i/lub stymulacji placebo, a każdy z tych montaży odbywał się jednokrotnie (np. Cerruti i Schlaug, 2009; Dockery i in., 2009; Maheux-Caron i in., 2021). Wydaje się, że na podstawie jednokrotnego oddziaływania trudno jest wnioskować o trwałej zmianie. Niemniej analiza tych danych wskazuje, że w grupach otrzymujących stymulację aktywną obserwowano większą poprawę w mierzonych funkcjach niż w grupach, które otrzymywały stymulację sham, czyli placebo.

Podsumowując, na podstawie informacji zebranych w tabeli 1, można uznać, że poprawę najczęściej uzyskiwano, gdy stymulacja była anodowa, czyli pobudzająca, dotyczyła obszaru grzbietowo-bocznej kory przedczołowej, a podawany prąd miał wartość większą niż 1 mA. Na uwagę zasługuje również zmiana, jaka zaszła na przestrzeni blisko 20 lat w prowadzeniu badań nad stymulacją tDCS. Początkowo czas stymulacji był krótki (10–20 min). Obecnie zazwyczaj czas stymulacji wynosi 25–40 min. Ponadto, w pierwszych badaniach nie zawsze były podawane dokładne parametry stymulacji (np. brak informacji o elektrodach odniesienia lub o powierzchni użytych elektrod). Obecnie wiadomo, że takie parametry również wpływają na uzyskiwane efekty.

Należy również zwrócić uwagę na ograniczenia dotychczasowych badań. Zaliczyć można tutaj: niejednorodną grupę badaną, różne protokoły stymulacji, często wyniki odnoszą się do efektów uzyskanych po jednej stymulacji lub do stymulacji o różnych wartościach prądu, niewielkie grupy badanych (zazwyczaj kilkanaście osób). Warto również zaznaczyć,

że zdecydowana większość autorów badań podkreśla fakt, że metoda przezczaszkowej stymulacji prądem stałym jest obiecującą metodą, która może poprawiać wiele aspektów funkcjonowania. Jednocześnie badacze podkreślają konieczność dalszej eksploracji tej metody.

Analiza dotychczasowych doniesień wskazuje, że tDCS istotnie wpływa na poprawę procesów poznawczych u zdrowych młodych dorosłych (Baharlouei i in., 2020; Figeys i in., 2021; Habich i in., 2021). Zastosowanie przezczaszkowej stymulacji prądem stałym w zdrowej populacji ma na celu przede wszystkim ocenę skuteczności tej metody oraz lepsze poznanie mechanizmu jej działania. Ponadto podejmowany jest aspekt usprawnienia funkcjonowania poznawczego osób zdrowych. Stymulacja funkcjonowania poznawczego u młodych dorosłych ma na celu optymalizację ich wydolności umysłowej, co z kolei ma być pomocne w sprośtaniu stawianym przed nimi wymaganiami, np. w obszarze związanym z pracą zawodową. Jednocześnie takie działania mają charakter protekcyjny i pozwalają budować rezerwę poznawczą (Negash i in., 2013; Stern, 2012).

Rezerwa poznawcza odnosi się do zdolności radzenia sobie z różnego typu wymaganiami w sytuacjach życia codziennego oraz zadaniowych (Stern 2002; Szepietowska, 2018). Ma to swoje odniesienie zarówno do osób zdrowych, jak i tych, u których występują uszkodzenia w obszarze mózgowym. Należy podkreślić fakt, iż o poziomie rezerwy poznawczej decydują interakcje wykształcenia, stylu życia (spędzania czasu wolnego, aktywności fizycznej, intelektualnej i społecznej), pozycji zawodowej (odpowiedzialności i zaangażowania intelektualnego) oraz statusu socjoekonomicznego, biorąc pod uwagę te zmienne od okresu wczesnej dorosłości (Opdebeeck, Martyr, Clare 2016; Stern 2003, 2009; Tucker, Stern 2011). Wskazuje to na zasadność stosowania metod usprawniających funkcjonowanie poznawcze w okresie wczesnej dorosłości.

Analiza dotychczasowych badań wykazała, że przezczaszkowa stymulacja prądem stałym wpływa korzystnie na funkcjonowanie poznawcze w grupie osób we wczesnej dorosłości, jednak uzyskane efekty nie są jednoznaczne (Baharlouei i in., 2020; Figeys i in., 2021; Habich i in., 2021; Turi i in., 2019). Zazwyczaj poprawa dotyczyła takich obszarów funkcjonowania, jak: pamięć robocza (Dockery i in., 2011; Brunoni i Vanderhasselt, 2014; Park i in., 2014; Richmond i in., 2014), podtrzymywania uwagi (Nelson i in., 2014), uczenia się motorycznego (Ciechanski i Kirton, 2017), wielozadaniowości/multitaskingu (Filmer i in., 2013; Hsu i in., 2015; Nelson i in., 2016), poprawiało czujność (Nelson i in., 2014). w badaniu

przeprowadzonym przez Richmonda i in. (2014) wykazano, że tDCS nie zmieniła tempa uczenia się w czasie, ale przesunęła całą krzywą uczenia się w górę.

Podsumowując, dotychczasowe badania wskazują na duży potencjał stymulacji tDCS, również w grupie osób zdrowych. Do potencjalnych korzyści ze stosowania stymulacji tDCS u zdrowych osób można wymienić poprawę w zakresie pamięci krótkotrwałej, pamięci operacyjnej, funkcji uwagowych, szybkości reakcji i czujności. Należy jednak uwzględnić fakt, że nadal stosunkowo niewiele jest badań w tej grupie osób i potrzebne są dalsze badania, które pomogłyby lepiej zrozumieć mechanizm działania tDCS, jak i pozwoliłyby na przygotowanie optymalnych parametrów stymulacji.

2. Metodologia badań własnych

2.1. Cel badań i jego uzasadnienie

Głównym celem przeprowadzonych badań było ocena wpływu przeczaszkowej stymulacji prądem stałym na funkcje wykonawcze osób zdrowych w okresie wczesnej dorosłości.

Na podstawie celu głównego sformułowano następujące cele szczegółowe:

- 1) Ocena wpływu zastosowania przeczaszkowej stymulacji prądem stałym w montażu stymulacja anodalna w lewym grzbietowo-bocznym obszarze kory przedczołowej (*dorsolateral prefrontal cortex*; DLPFC) i katodalna w prawym obszarze nadoczodołowym (*right supraorbital area*), czyli odpowiednio F3 i Fp2 wg systemu 10-20 EEG, na sprawność pamięci operacyjnej u młodych dorosłych.

Taki protokół stymulacji był stosowany w innych badaniach, w których wykazano, że poprawia ona pamięć operacyjną, będącą składową funkcji wykonawczych. Jednocześnie nie wszystkie badania wykazały poprawę. O ile montaż elektrod w badaniach był taki sam, o tyle występowały różnice m.in. w natężeniu podawanego prądu, wielkości elektrod, czasie stymulacji czy liczbie spotkań.

- 2) Ocena wpływu anodowej stymulacji lewego obszaru DLPFC na inne niż pamięć operacyjna procesy funkcji wykonawczych, zgodnie z podziałem zastosowanym przez Kropotova (Kropotov, 2009), tj. proces pobudzania, hamowania oraz kontroli działania.
- 3) Analiza różnic w wynikach uzyskiwanych przez osoby poddane stymulacji aktywnej od wyników osób, które otrzymywały stymulację nieaktywną (sham; placebo; stymulacja pozorowana) oraz osób z grupy kontrolnej pasywnej, nie poddanych żadnym oddziaływaniom.

Dla powyższych celów można znaleźć uzasadnienie dwojakiego rodzaju: poznawcze oraz praktyczne. Obecnie obserwuje się wzrost zainteresowania metodami, które w sposób nieinwazyjny mogą poprawić funkcjonowanie poznawcze, także wśród osób zdrowych. Rozwój technologii oraz fakt, że społeczeństwa się starzeją, przyczyniają się do podejmowania licznych badań, mających na celu znalezienie odpowiedzi na pytanie: „jak poprawić funkcjonowanie poznawcze i budować rezerwę poznawczą na przyszłość?”. Jak wspomniano wcześniej (zob. rozdział 1.3.), badania wskazują na skuteczność tDCS w szeroko pojętym usprawnianiu funkcji poznawczych. Uwagę jednak zwraca fakt, iż zwykle doniesienia naukowe

w tym obszarze skupiają się na jednokrotnym oddziaływaniu eksperymentalnym, a należy pamiętać, że mechanizmem leżącym u podstaw skuteczności tej metody jest neuroplastyczność. Zatem, aby ocenić skuteczność stymulacji, potrzebne są powtarzalne oddziaływania (Kuo i in., 2018; Pąchalska i in., 2020; Samani i in., 2019). Ponadto do ograniczeń dotychczasowych badań w tym zakresie można zaliczyć m.in. małe grupy osób badanych. Często liczyły one kilka osób, dodatkowo badani byli często zróżnicowani pod wieloma aspektami, ważnymi z perspektywy badań naukowych (m.in. wiek, stan zdrowotny). Co więcej, stosowano różne protokoły stymulacji. Wyniki takich badań nie mogą być rozpatrywane jako w pełni konkluzywne.

Ze względu na obserwowane globalne trendy oraz rosnące zainteresowanie neurostymulacją, przeprowadzenie takiego badania wydawało się uzasadnione. Badanie własne stanowi istotny i innowacyjny wkład w rozwój nauki zarówno na poziomie krajowym, jak i międzynarodowym w dziedzinie neuropsychologii i psychologii poznawczej. Ponadto jest ono odpowiedzią na wcześniej wspomniane luki i ograniczenia dotychczasowych badań w tym obszarze.

Przedstawiona praca ma również wymiar praktyczny. Ocena wpływu przezczaszkowej stymulacji prądem stałym na funkcje wykonawcze u zdrowych osób w okresie wczesnej dorosłości może stanowić źródło cennych informacji na temat potencjalnych korzyści i skuteczności tej metody terapeutycznej. Uzyskane wyniki mogą przyczynić się do powstania programów profilaktycznych czy też przyczyniających się do budowania rezerwy poznawczej, ważnej w perspektywie pomyślnego starzenia się (Negash i in., 2013; Stern, 2009; Szepietowska, 2019). Co więcej, biorąc pod uwagę grupę osób badanych, czyli zdrowe osoby w okresie wczesnej dorosłości oraz oczekiwane efekty po zastosowaniu takiej stymulacji, może to wpłynąć na poprawę jakości życia osób poddawanych stymulacji. Ponadto tak kompleksowo przeprowadzone badanie może pozwolić lepiej poznać mechanizm działania stymulacji tDCS. Ocena wpływu anodalnej stymulacji lewego obszaru DLPFC na różne procesy funkcji wykonawczych może dostarczyć szczegółowych informacji na temat specyficzności efektów stymulacji. Może to być pomocne w identyfikacji konkretnych obszarów i funkcji wykonawczych, które są najbardziej podatne na poprawę za pomocą tej metody. Takie informacje mogą mieć znaczenie dla projektowania terapii opartych na stymulacji prądem stałym w celu poprawy funkcjonowania poznawczego u osób z deficytami poznawczymi. Analiza różnic w wynikach pomiędzy grupą otrzymującą stymulację aktywną a grupą otrzymującą stymulację pozorowaną może pozwolić na ocenę specyficznego efektu stymulacji

prądem stałym. To z kolei może mieć istotne implikacje dla praktyki klinicznej, ponieważ pozwoli na lepsze zrozumienie, czy obserwowane efekty są wynikiem samej stymulacji, czy też wynikają z efektu placebo lub innych czynników.

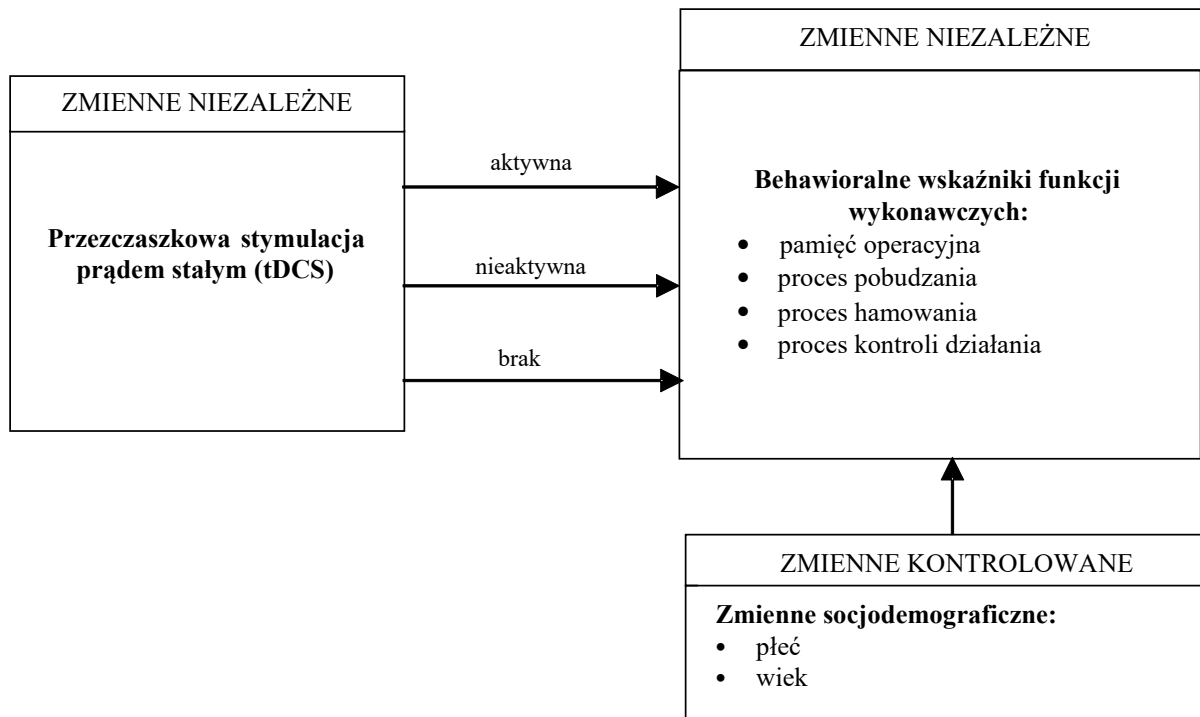
Podsumowując, uzasadnienie praktyczne przeprowadzenia tych badań wynika z potrzeby poszerzenia wiedzy na temat potencjalnych korzyści, specyfiki i skuteczności przezczaszkowej stymulacji prądem stałym w kontekście funkcji wykonawczych oraz jej potencjalnego zastosowania zarówno u osób zdrowych, jak i w terapii zaburzeń poznawczych.

2.2. Założenia teoretyczne i model badań

Podstawy teoretyczne pracy zostały zaczerpnięte z trzech subdyscyplin naukowych psychologii: neuropsychologii, psychologii poznawczej oraz psychologii rozwoju człowieka. Te trzy obszary psychologii przenikają się i uzupełniają. Psychologia poznawcza skupia się, w ogólnym ujęciu, na badaniu procesów i struktur poznawczych (Nęcka i in., 2020). Neuropsychologia z kolei zajmuje się związkiem między mózgiem (czy ogólniej – układem nerwowym) a szeroko pojętym zachowaniem człowieka, w tym złożonymi funkcjami psychicznymi, jak funkcjonowanie poznawcze. Na podstawie analizy wzorów aktywizacji mózgu wiadomo, że konkretne obszary mózgowie są składowymi większych systemów, w obrębie których przebiegają pewne procesy. w takim podejściu zakłócenie bądź stymulowanie pracy jednego lub kilku z obiektów (obszarów) zmienia dynamikę funkcjonowania całego systemu (Pąchalska i in., 2020). w prezentowanej pracy skupiono się na funkcjach wykonawczych, które rozumiane są jako funkcje zarządzające szeroko pojętym funkcjonowaniem poznawczym. Bazując na psychologii rozwoju człowieka, rozwój ujmowany jest jako proces trwający przez całe życie. Dzięki niemu dochodzi do zmian w ciągu życia, a zmiany te dotyczą wszystkich sfer funkcjonowania – również funkcjonowania poznawczego i wykonawczego (Formisano i in., 2022; Trempała, 2001). Analizując rozwój poznawczy człowieka, należy zwrócić uwagę, iż jest on zróżnicowany, a poszczególne funkcje rozwijają się w odmiennym tempie w różnym wieku (Boen i in., 2021).

Rysunek 1

Model teoretyczny relacji pomiędzy zmiennymi



Założono, że oddziaływanie eksperymentalne, czyli stymulacja anodowa lewego obszaru grzbietowo-bocznej kory przedczołowej (DLPFC), wpłynie na poprawę funkcjonowania w zakresie pamięci operacyjnej. Przewiduje się również wystąpienie poprawy wykonywania zadań angażujących inne procesy funkcji wykonawczych, tj. proces pobudzania, hamowania oraz kontroli działania.

Po przeanalizowaniu aktualnego stanu wiedzy dotyczącego tematyki podjętych badań sformułowano cztery problemy badawcze oraz postawiono osiem pytań badawczych. Zestawienie problemów i pytań znajduje się w tabeli 2.

Tabela 2

Zestawienie problemów i pytań badawczych

Problemy badawcze	Pytania badawcze
1. Przechczaszkowa stymulacja prądem stałym (tDCS) w montażu anoda F3, katoda Fp2 wpływa na funkcje wykonawcze u zdrowych osób w okresie wczesnej dorosłości.	a1. Czy tDCS wpływa na proces pamięci operacyjnej wyrażonej w: <ul style="list-style-type: none">– sumie punktów w zadaniu <i>Klocki Corsiego (Corsi Blocks Test, CBT)</i>;– rozpiętości pamięci (czyli liczbie poprawnie odtworzonych elementów) w zadaniu <i>Klocki Corsiego (Corsi Blocks Test, CBT)</i>;– całkowitej liczbie poprawnych prób w zadaniu <i>Klocki Corsiego (Corsi Blocks Test, CBT)</i>;– liczbie poprawnych powtórzeń w zadaniu <i>Powtarzanie cyfr wprost (Digit Span Forward; DSF)</i>;– liczbie poprawnych powtórzeń w zadaniu <i>Powtarzanie cyfr wstak (Digit Span Backward; DSB)</i>;– procencie poprawnie wykonanych ruchów w <i>Teście sortowania kart Berg (Berg's Cards Sorting Test; BCST)</i>;– stosunku ruchów wykonanych do minimalnej liczby ruchów w <i>Teście wieży londyńskiej (Tower of London, TOL)</i>?
	a2. Czy tDCS wpływa na proces pobudzania wyrażonego w: <ul style="list-style-type: none">– liczbie poprawnych reakcji w pierwszej części zadania <i>Go/No-Go (GNG)</i>;– liczbie poprawnych reakcji w drugiej części zadania <i>Go/No-Go (GNG)</i>;– sumie poprawnych reakcji w zadaniu <i>Go/No-Go (GNG)</i>;– średnim czasie prawidłowej reakcji w zadaniu <i>Go/No-Go (GNG)</i>;– liczbie opuszczeń w pierwszej części zadania <i>Go/No-Go (GNG)</i>;– liczbie opuszczeń w drugiej części zadania <i>Go/No-Go (GNG)</i>;– sumie opuszczeń w zadaniu <i>Go/No-Go (GNG)</i>;– czasie do wykonania pierwszego ruchu w <i>Teście wieży londyńskiej (Tower of London, TOL)</i>;– czasie wykonania <i>Testu kolorowych połączeń (Color Trail Test, CTT-1 i CTT-2)</i>?
	a3. Czy tDCS wpływa na proces hamowania wyrażonego w: <ul style="list-style-type: none">– liczbie błędnych reakcji w pierwszej części zadania <i>Go/No-Go (GNG)</i>;– liczbie błędnych reakcji w drugiej części zadania <i>Go/No-Go (GNG)</i>;– sumie błędnych reakcji w zadaniu <i>Go/No-Go (GNG)</i>;– średnim czasie błędnej reakcji w zadaniu <i>Go/No-Go (GNG)</i>?
	a4. Czy tDCS wpływa na proces kontroli działania wyrażony w: <ul style="list-style-type: none">– wskaźniku zakłóceń w <i>Teście kolorowych połączeń (Color Trail Test, CTT)</i>;– procencie błędów perseweracyjnych w zadaniu <i>Sortowania kart Berg (Berg's Cards Sorting Test; BCST)</i>;– procencie błędów nieperseweracyjnych w zadaniu <i>Sortowania kart Berg (Berg's Cards Sorting Test; BCST)</i>;

Problemy badawcze**Pytania badawcze**

		<ul style="list-style-type: none">– procencie reakcji zgodnych z koncepcją logiczną w zadaniu <i>Sortowania kart Berg (Berg's Cards Sorting Test; BCST)</i>;– całkowitym czasie wykonania <i>Testu wieży londyńskiej (Tower of London, TOL)</i>;– różnicy ruchów wykonanych i minimalnej liczbie ruchów w <i>Teście wieży londyńskiej (Tower of London, TOL)</i>?
		b. Na które elementy składowe funkcji wykonawczych stymulacja tDCS działa najbardziej?
2. Występowanie związku pomiędzy wyjściowym poziomem mierzonych zmiennych (tj. pamięci działania, pobudzania, hamowania oraz kontroli działania) a wielkością zmiany po przebytej stymulacji tDCS u zdrowych osób dorosłych w okresie wczesnej dorosłości.	a.	Czy wyjściowy poziom funkcji wykonawczych, rozpatrywanych jako: <ul style="list-style-type: none">1. pamięć operacyjna,2. proces pobudzania,3. proces hamowania,4. proces kontroli działania, ma związek z wielkością zmiany w zakresie tych funkcji u osób zdrowych w okresie wczesnej dorosłości po przebytej stymulacji tDCS?
3. Występowanie związku pomiędzy wielkością zmiany w pamięci operacyjnej a wielkością zmian w innych procesach funkcji wykonawczych po przebytej stymulacji tDCS u zdrowych osób dorosłych w okresie wczesnej dorosłości.	a.	Czy wielkość zmian w badaniu pamięci operacyjnej koreluje z wielkością zmian w pozostałych procesach funkcji wykonawczych, czyli procesach pobudzania, hamowania oraz kontroli działania?
	b.	Jakie zmiany w pozostałych procesach funkcji wykonawczych mają najsilniejszy związek ze zmianami w badaniu pamięci operacyjnej?
4. Płeć nie ma związku z wielkością poprawy w badanych obszarach procesów funkcji wykonawczych.	a.	Czy płeć ma związek z wielkością poprawy w: <ul style="list-style-type: none">– pamięci operacyjnej,– procesie pobudzania,– procesie hamowania,– procesie kontroli działania u zdrowych osób dorosłych w okresie wczesnej dorosłości?

W odniesieniu do zaproponowanego modelu badań, przedstawionych problemów i pytań badawczych sformułowano cztery hipotezy badawcze, opierając się na przeglądzie badań przedstawionym w części teoretycznej pracy (tabela 1).

Tabela 3

Hipotezy i ich uzasadnienie

	<p>H1. Przewodząca stymulacja prądem stałym (tDCS) w montażu anoda F3, katoda Fp2 poprawia procesy funkcji wykonawczych:</p> <ul style="list-style-type: none">H1.a1. pamięci operacyjnej,H1.a2. proces pobudzania,H1.a3. proces hamowania,H1.a4. proces kontroli działania <p>u zdrowych osób w okresie wczesnej dorosłości.</p>
Uzasadnienie hipotezy	<p>Dotychczasowe badania wskazują, że stymulacja tDCS w montażu anoda F3 i katoda Fp2 poprawiają procesy poznawcze osób w okresie wczesnej dorosłości (Habich i in., 2021). Na poziomie neuronalnym procesy pamięci operacyjnej opierają się głównie na sieci czołowo-ciemieniowej, w skład której wchodzi m.in. DLPFC (Smith i Jonides, 1998), czyli obszar, który jest poddawany stymulacji w tym montażu. Wcześniejsze badania wykazały poprawę w zakresie procesów pamięci operacyjnej (Cunillera i in., 2014; Fregni i in., 2005b), ale również obserwowano poprawę innych procesów funkcji wykonawczych, m.in. dotyczącą kontroli działania (Habich i in., 2021; Leshikar i in., 2017).</p>
	<p>H2. Efekt stosowania aktywnej stymulacji tDCS u zdrowych osób w okresie wczesnej dorosłości ma negatywny związek z wyjściowym poziomem funkcji wykonawczych:</p> <ul style="list-style-type: none">H2.1. pamięci działania (pamięć operacyjna),H2.2. procesu pobudzania,H2.3. procesu hamowania,H2.4. procesu kontroli działania
	<p>w taki sposób, że im niższy wynik w danym procesie w pre-teście, tym większa poprawa po przebytej stymulacji tDCS występuje w post-teście.</p>
Uzasadnienie hipotezy	<p>Badania nad usprawnianiem procesów poznawczych wskazują, że większej poprawy w grupie osób zdrowych (tj. bez uszkodzeń OUN i bez deficytów poznawczych) można oczekiwać u osób o niższych poziomach wyjściowych mierzonych testami poznawczymi niż u osób, których wyniki są wyższe (Schroeder i in., 2020).</p>

H3. Stymulacja tDCS obszaru pamięci operacyjnej ma związek z poprawą pozostałych składowych funkcji wykonawczych.

Uzasadnienie hipotezy

Ośrodkowy układ nerwowy jest dynamicznym układem, który można porównać do sieci naczyń połączonych. Na poziomie neuronalnym procesy pamięci operacyjnej opierają się głównie na sieci czołowo-ciemieniowej, w skład której wchodzi m.in. DLPFC (Smith i Jonides, 1998), czyli obszar, który jest poddawany stymulacji w tym montażu. Wcześniejsze badania przy montażu stymulacji, jak w niniejszym badaniu, wykazały poprawę w zakresie procesów pamięci operacyjnej (Cunillera i in., 2014; Fregni i in., 2005), ale również obserwowano poprawę innych procesów funkcji wykonawczych, m.in. dotyczącą kontroli działania (Habich i in., 2021; Leshikar i in., 2017).

H4. Płeć osób badanych nie ma związku z poprawą w zakresie pamięci operacyjnej, pobudzania, hamowania oraz kontroli działania.

Uzasadnienie hipotezy

Niektóre badania dotyczące funkcjonowania neuropoznawczego wskazują, że istnieją istotne różnice między płciami w zakresie funkcji wykonawczych. Ważną zmienną, która wpływa na interpretację potencjalnych różnic między płciami, są różne trajektorie rozwojowe (Grissom i Reyes, 2019).

2.3. Charakterystyka narzędzi badawczych

Osoby biorące udział w badaniu wypełniały baterię narzędzi badawczych, a uzyskane wyniki były wskaźnikami zmiennych przedstawionych w tabeli 4. Podstawowe dane socjodemograficzne, istotne z perspektywy prowadzonego badania, czyli: wiek i płeć, zebrano za pomocą metryczki. Dobierając metody pomiaru, uwzględniono:

- adekwatność narzędzi do badanych funkcji poznawczych i wykonawczych;
- dostępność poszczególnych narzędzi;
- czas wykonywania testów (starano się dokonać wyboru narzędzi tak, by całkowity czas wypełnienia mieścił się w przedziale 50–60 min);
- wyniki opublikowanych dotychczas badań.

Ponadto każdy uczestnik badania otrzymał:

- informację dla uczestnika badania naukowego o charakterze i przebiegu badań wraz z informacją o możliwości rezygnacji w każdej chwili bez podawania przyczyny;

- świadomą, dobrowolną zgodę uczestnika na wzięcie udziału w badaniu naukowym, zgodnie z obowiązującą ustawą z dnia 10 maja 2018 roku o Ochronie Danych Osobowych (jeden egzemplarz dla uczestnika badania, jeden – dla prowadzącego badanie).

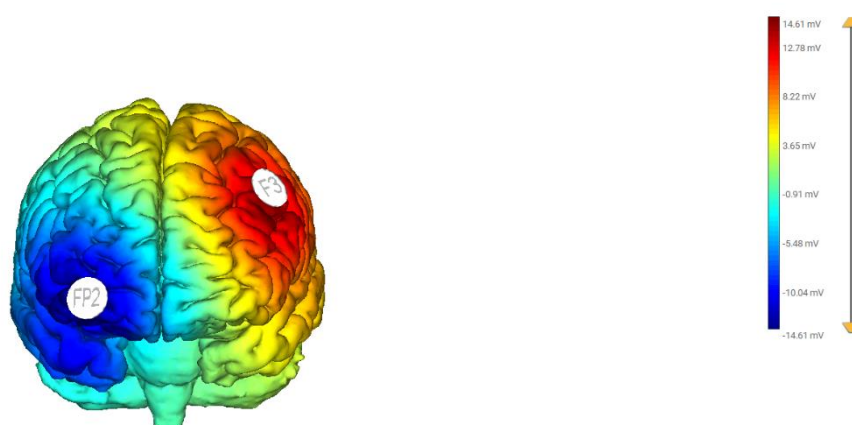
W kolejnych podrozdziałach zaprezentowano szczegółowy opis narzędzi badawczych zastosowanych w niniejszej dysertacji.

Stymulacja tDCS

Stymulacja była wykonywana za pomocą 8-kanalowego aparatu Starstim tES z oprogramowaniem zarządzającym NIC (Neuroelectronics Instrument Controller) firmy Neuroelectronics. Do stymulacji wykorzystano okrągłe elektrody gąbkowe o powierzchni 25 cm² każda. w badaniu zastosowano montaż: stymulacja anodowa w obszarze lewej grzbietowo-bocznej kory przedczołowej i katodowa w okolicy nadoczodołowej prawej (odpowiednio: F3 i Fp2, zgodnie z system 10-20 EEG). Dawka ładunku elektrycznego podawanego podczas jednego spotkania w grupie eksperymentalnej wynosiła 3640,00 mC. Na rysunku 2 przedstawiono widok z użytego w badaniach oprogramowania z podglądem stymulacji, gdzie ukazano rozkład pola elektrycznego podczas tDCS.

Rysunek 2

Podgląd stymulacji



Metryczka

W kwestionariuszu metryczki uwzględniono pytania, dotyczące podstawowych danych socjodemograficznych: płeć (kobieta, mężczyzna), wiek wyrażony w latach, wykształcenie – podstawowe, zawodowe, średnie, wyższe, liczba lat nauki. Ponadto pytano o stwierdzone choroby przewlekłe, epizody padaczkowe w przeszłości, doznane urazy czaszkowo-mózgowe, przyjmowane leki.

Klocki Corsiego (Corsi Blocks Test, CBT)

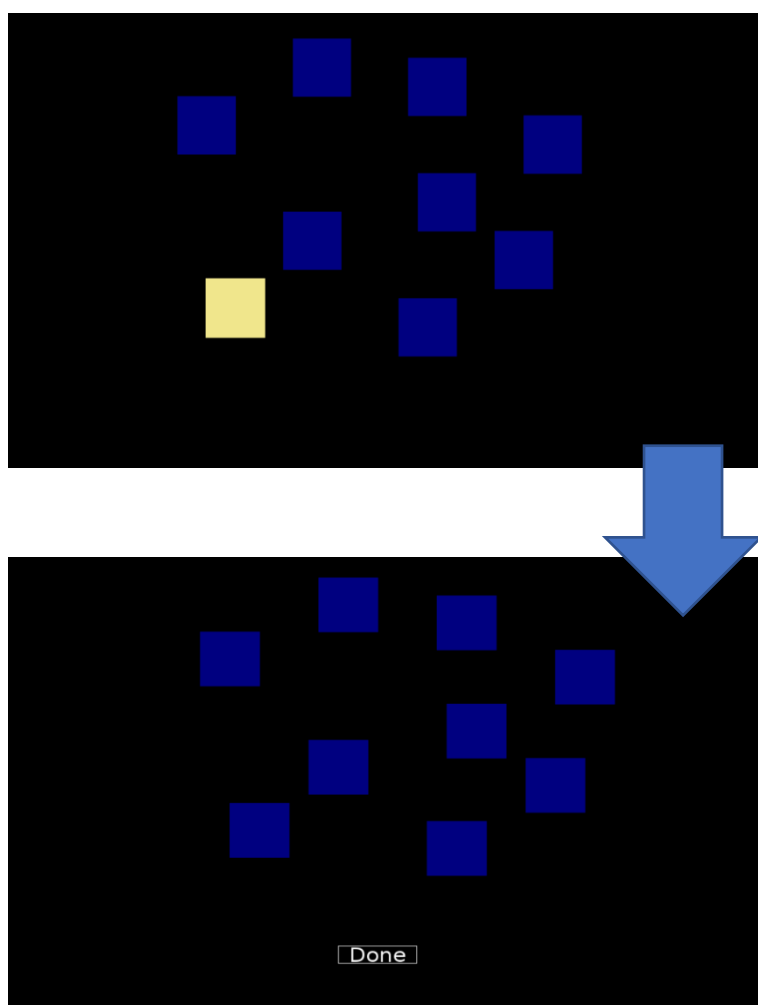
Klocki Corsiego (Corsi Blocks Test, CBT) są szeroko stosowanym narzędziem do oceny pamięci roboczej, w szczególności jej aspektu wzrokowo-przestrzennego (Berch i in., 1998; Brunetti i in., 2014). Test jest tradycyjnie wykonywany przy użyciu dziewięciu kwadratowych bloków umieszczonych na drewnianej tablicy (Corsi, 1972), ale opracowano również wiele wersji komputerowych (Mueller i Piper, 2014; Vandierendonck i in., 2004). *Klocki Corsiego* są stosowane w pracach dotyczących rozwijania koncepcji pamięci roboczej modelu Badeleya (Vandierendonck i in., 2004). Zadania, wykorzystywane w tej metodzie, są związane z modalnością wzrokowo-przestrzenną pamięci operacyjnej zarówno na poziomie behawioralnym, jak i neuropsychologicznym. Zadanie polega na zapamiętywaniu i odwzorowywaniu przestrzennego układu klocków. Badany obserwuje planszę, na której w ustalonych odstępach czasu (np. raz na sekundę) pojawiają się sześciennne klocki w układzie i tempie ustalonym przez eksperymentatora. Po zakończeniu prezentacji badany odtwarza ułożenie i kolejność klocków. Miarą jest liczba poprawnie odtworzonych elementów (ułożenie i kolejność).

W przeprowadzonym badaniu wykorzystano test *Klocki Corsiego* z oprogramowania *Psychology Experiment Building Language (PEBL)* (Mueller i Piper, 2014). Zadaniem badanego było zapamiętanie sekwencji lokalizacji kwadratów na ekranie. w każdej próbie na ekranie pojawiało się dziewięć niebieskich kwadratowych bloków, a następnie określona liczba kwadratów kolejno zapalała się na żółto, jeden po drugim. Uczestnicy byli instruowani, aby zapamiętać sekwencję, a następnie zaznaczyć na ekranie dotykowym bloki w tej samej kolejności. Po tym należy zatwierdzić wykonanie zadania, zaznaczeniem pola z napisem *Done*. Test zaczyna się od zadania próbnego. Są trzy próby treningowe z sekwencją o długości trzech bloków. Następnie zaczyna się właściwa część zadania. Poziom trudności wzrasta, w zależności od wyników uzyskiwanych przez badanego. Początkowa liczba bloków do zapamiętania to dwa. Sekwencja zwiększa się o jeden, gdy osoba ukończy dwie poprawne

próby z rzędu, aż do osiągnięcia maksymalnej trudności, czyli dziewięciu bloków (Schaefer i in., 2022). Poniżej zaprezentowano widok ekranu w trakcie wykonywania zadania (rysunek 3).

Rysunek 3

Widok zadania Klocki Corsiego z PEBL



Wcześniejsze badania wykazały, że sposób prezentacji zadania – tradycyjny vs elektroniczny, nie miał wpływu na wyniki uzyskiwane przez osoby badane w teście *Klocki Corsiego* (Nelson i in., 2000; Robinson i Brewer, 2016). Istnieją również doniesienia, które wykazują większą dokładność w odtwarzaniu elementów w standardowym teście *Klocków*

Corsiego w porównaniu z wersją elektroniczną (Claessen i in., 2015). w niniejszym badaniu skupiono się na różnicy w wykonaniu zadania w trakcie pre-testu i post-testu

Test Powtarzanie cyfr z WAIS-R(PL)

Test bada pamięć werbalną bezpośrednią (cyfry wprost) oraz pamięć operacyjną (cyfry wspak) (Kotapka-Minc, 2007; Wambach i in., 2011). Miarą jest liczba poprawnych powtórzeń. Zadanie składa się z dwóch części: powtarzanie cyfr wprost, w którym badany proszony jest o powtarzanie rosnących zakresów cyfr w kolejności, w jakiej były prezentowane przez prowadzącego badanie, oraz powtarzanie cyfr wspak, gdzie badany proszony jest o powtarzanie rosnących zakresów cyfr w odwrotnej kolejności, niż były prezentowane (Brzeziński i Wechsler, 2011; Wiejak i Krasowicz-Kupis, 2011). Dla każdej rozpiętości szeregu cyfr są dwie próby/dwa zestawy danej pozycji. Zadanie zostaje przerwane, gdy osoba badana błędnie powtórzy dwa zestawy danej rozpiętości. Surowy wynik jest sumą prób powtórzonych poprawnie, a następnie może być przekształcony w wynik skali skorygowanej o wiek (Brzeziński i Wechsler, 2011).

Test *Powtarzania cyfr wprost* jest głównie zadaniem mierzącym zakres pamięci bezpośredniej. Bada również koncentrację uwagi (Hornowska, 2004). Podtest polegający na powtarzaniu cyfr wspak jest trudniejszy i wymaga dodatkowo uruchomienia umiejętności tworzenia sekwencji w porządku odwrotnym. Nie należy ich również traktować jako ogólnej miary pamięci (Golden, 1979a; Hornowska, 2004). Wynik w teście mogą obniżać dystraktory sytuacyjne, napięcie emocjonalne (Kucharska-Pietura i in., 2012) oraz uszkodzenia ośrodkowego układu nerwowego (Hornowska, 2004). Szczególnie uszkodzenia lewej półkuli, zwłaszcza w obrębie płata skroniowego, wpływają na obniżenie wyników w zadaniu powtarzania cyfr wprost i wspak. z kolei uszkodzenie zlokalizowane w obrębie prawej półkuli, przede wszystkim w okolicach płata czołowego, wpływa na pogorszenie wyniku w powtarzaniu cyfr wspak (Golden, 1979a; Hornowska, 2004).

Test Go/No-Go (Go/No-Go task; GNG)

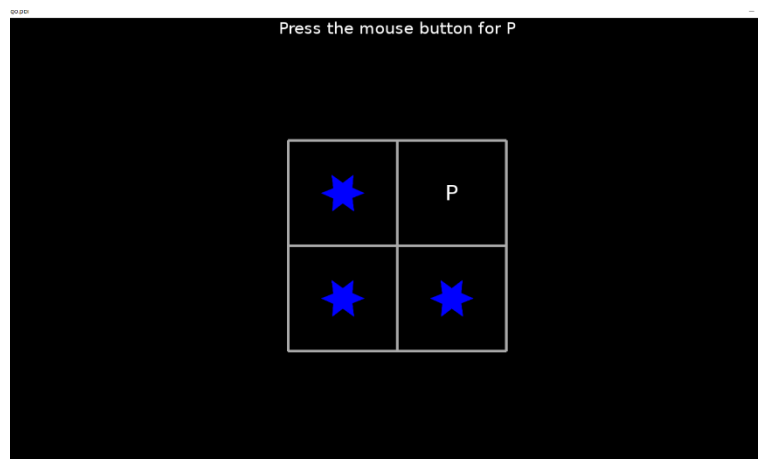
Test Go/No-Go (Go/No-Go task; GNG) polega na odtwarzaniu konfliktowych reakcji motorycznych (Mostofsky i in., 2003; Simmonds i in., 2008). Użyta w badaniu komputerowa wersja testu z the PEBL daje dwie miary hamowania reakcji: dokładność mierzona poprzez całkowitą liczbę błędów oraz szybkość reakcji mierzona w sekundach. w obu miarach niższa

wartość wskazuje na lepsze wyniki. Test angażuje w wykonywanie zadań kontrolę motoryczną, hamowanie reakcji, zdolność do samokontroli, uwagę oraz zdolność uczenia się (Gomez i in., 2007; Singh i Sharma, 2015).

Zadanie składa się z dwóch części, które następują bezpośrednio po sobie. w przeprowadzonym badaniu uczestnicy byli proszeni o śledzenie prezentacji liter i reagowanie na literę docelową (w pierwszej części była to litera P) poprzez naciśnięcie przycisku na klawiaturze lub kliknięcie myszką, przy jednoczesnym wstrzymaniu odpowiedzi na literę niebędącą literą docelową (w pierwszej części była to litera R). Litery są generowane losowo i prezentowane przez 500 milisekund w jednym z czterech kwadratów, ułożonych we wzór 2×2 z jedną gwiazdą w każdym kwadracie. Przerwa między ekspozycją kolejnego bodźca trwała 1500 milisekund. w następnej części literą docelową była litera R i na nią badani mieli reagować poprzez naciśnięcie przycisku na klawiaturze lub kliknięcie myszką. z kolei w przypadku pojawienia się litery P, osoby badane miały za zadanie powstrzymać się od reakcji. Poniżej przedstawiono obraz z tego zadania.

Rysunek 4

Widok zadania Go/No-Go z PEBL



Każda z części rozpoczyna się od zadań testowych, gdzie osoba wykonuje 10 prób, które nie liczą się do ogólnego wyniku uzyskanego przez badanego. Ma to na celu wprowadzenie osoby badanej do zadania.

Test sortowania kart Berg (Berg's Card Sorting Test; BCST)

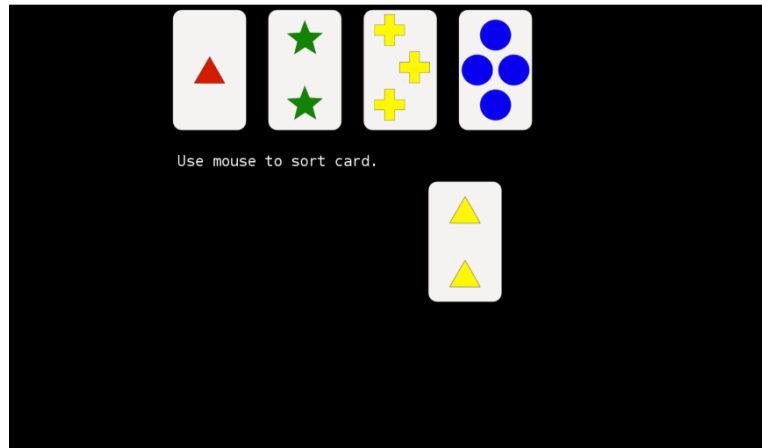
Test sortowania kart Berg (BCST) jest opracowaną przez PEBL wersją *Testu sortowania kart z Wisconsin* (*Wisconsin Card Sorting Test; WCST*). Powszechna nazwa testu *Test sortowania kart z Wisconsin* jest zastrzeżonym znakiem towarowym. Metoda została opracowana przez Estę Berg na Uniwersytecie Wisconsin (Berg, 1948), stąd też wzięła się alternatywna nazwa narzędzia wykorzystanego w pracy.

Test służy do pomiaru funkcji wykonawczych rozumianych jako funkcje nadzorcze, kontrolujące i kierujące poznawczą aktywnością człowieka (Jodzio, 2017). w oryginalnej wersji uczestnicy sortują karty różniące się kolorem, symbolami oraz liczbą symboli na cztery stopy. Metodą prób i błędów określają zasadę klasyfikacji. Po osiągnięciu stałego, poprawnego dopasowania zasada jest zmieniana. w komputerowej wersji cały proces jest zautomatyzowany, co pozwala zaoszczędzić czas i ułatwia liczenie punktów (Piper i in., 2015).

Wykorzystana w badaniu wersja składała się z talii 64 kart. Osoba badana dopasowywała każdą kartę z talii do jednej z czterech kart wzorcowych. Badany sam określał regułę sortowania, wykorzystując otrzymywaną po każdej reakcji informację, czy jego odpowiedź była dobra, czy zła. Najlepszą miarą funkcji wykonawczych stanowią następujące wskaźniki: liczba błędów ogółem, procent odpowiedzi pojęciowych, liczba zaliczonych kategorii, odpowiedzi perseweracyjne i błędy perseweracyjne (Jodzio, 2017). w przeprowadzonym badaniu oceniono następujące wskaźniki: błędy perseweracyjne (wyrażone w procentach), błędy nieperseweracyjne (wyrażone w procentach), reakcje zgodne z koncepcją logiczną (wyrażone w procentach), liczbę poprawnie ułożonych kategorii, liczbę prób potrzebnych do ułożenia pierwszej karty (Piper i in., 2012). Na rysunku 5 zaprezentowano widok z zadania.

Rysunek 5

Widok zadania BCST z PEBL



Wcześniejsze badanie wykorzystujące BCST w grupie młodych dorosłych potwierdziło rzetelność i trafność m. in. tego narzędzia (Piper i in., 2015). Warto zwrócić uwagę na niejednoznaczne wyniki dotyczące oceny związku zaburzeń wykrywanych za pomocą tego testu i zaburzeń pamięci operacyjnej. Stwierdzone korelacje wyników w teście sortowania kart z miarami zakresu uwagi, czyli pojemności pamięci bezpośredniej, były zróżnicowane (Jodzio, 2017). Część badaczy przypisuje zaburzeniom uwagi i pamięci przyczynową rolę problemów z wykonaniem testu sortowania kart (Royall i in., 2002), inni z kolei są przeciwni takiemu podejściu (Paolo, 1995). Korelacje między wynikami w teście sortowania kart a testami badającymi uwagę i pamięć operacyjną były wyższe w grupie osób młodszych niż starszych (Jodzio, 2017).

Test wieży londyńskiej (Tower of London; TOL)

Test wieży londyńskiej (Tower of London; TOL) bada funkcje wykonawcze, w sposób szczególnie angażując zdolność planowania i przewidywania. Istotą testów wieży, w tym *Testu wieży londyńskiej*, jest znalezienie najlepszego rozwiązania polegającego na podzieleniu całego działania – ostatecznego celu – na mniejsze czynności, czyli zadania pośrednie. Jednocześnie

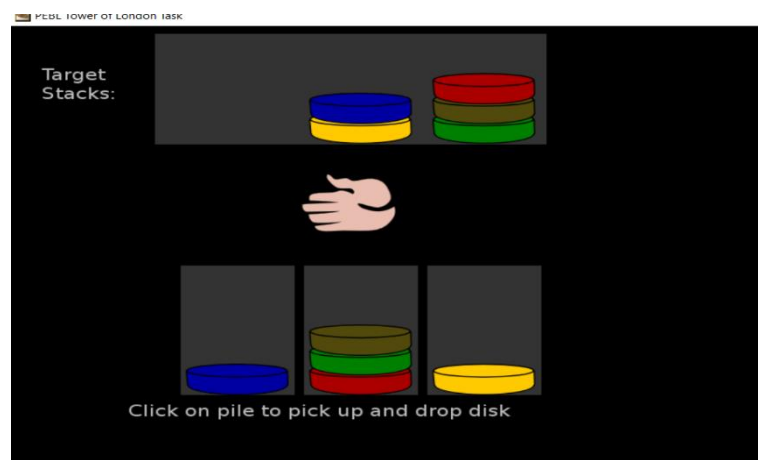
osoba wykonująca zadanie ma zachować ściśle ustalone zasady oraz określoną kolejność (Shallice, 1982).

Istnieje wiele wariantów tego zadania. Różnią się one zarówno poziomem trudności, jak i rodzajem konstrukcji (drewniane vs komputerowe) (Lezak, 2012; Piper i in., 2015). Na podstawie wykonania testu ocenić można następujące wskaźniki: łączny czas wykonania zadania, czas do momentu wykonania pierwszego ruchu, czas wykonania poszczególnych zadań, liczba wykonanych ruchów w poszczególnych zadaniach oraz liczba ruchów ogółem. Ponadto w podsumowaniu jest informacja o minimalnej liczbie ruchów potrzebnych do prawidłowego wykonania całego zadania, jak i poszczególnych prób. Obliczany jest również bieżący wynik całkowity, który wynosi jeden punkt za każdy stos krążków w poprawnie rozwiązanych zadaniach.

W przeprowadzonym badaniu uczestnicy wykonywali wariant zadania, składający się z pięciu krążków, które należy rozłożyć wg wzoru na trzech stosach (rysunek 6). Do wykonania jest osiem przykładów. Poziom trudności kolejnych zadań stopniowo wzrasta. Nie ma ograniczeń dotyczących liczby wykonanych ruchów. Do wykorzystania są trzy tożsame wersje alternatywne (A, B i C). w przeprowadzonym badaniu w pre-teście badani wykonywali wersję A, natomiast w post-teście – wersję B. Wzorem dla tego zadania jest praca Phillips i współpracowników (1999).

Rysunek 6

Widok zadania TOL z PEBL



Kolorowy test połączeń wersja dla dorosłych (Color Trails Test; CTT)

Kolorowy test połączeń wersja dla dorosłych (*Color Trails Test; CTT*) jest testem typu papier – ołówek. Służy do badania procesów związanych z uwagą i funkcjami wykonawczymi, a w szczególności do oceny celowego przeszukiwania materiału, utrzymywania i przerzutności uwagi, sekwencyjnego przetwarzania informacji oraz monitorowania własnego zachowania. Ponadto w wykonanie zadania zaangażowane są także zdolności wzrokowo-motoryczne (Łojek i Stańczak, 2012).

Test składa się z dwóch części – CTT-1 i CTT-2, wykonywanych bezpośrednio jedna po drugiej. Każda z części zawiera różowe i żółte kółka, w których umieszczone są liczby od 1 do 25. Zadaniem badanego jest połączenie liczb liniami prostymi w porządku rosnącym. w CTT-2 należy kolejne punkty łączyć tak, aby zachować naprzemienność kolorystyczną. Badanie każdą częścią testu przerywa się po 240 sekundach. CTT posiada cztery formy (A, B, C i D), dające możliwość prowadzenia badań podłużnych. w niniejszym badaniu w pre-teście wykorzystano formę A, natomiast w post-teście – formę B.

Miarą sprawności wykonania testu jest czas wykonania testu przez osobę badaną oraz poprawność wykonania obu części testu. Podstawowymi wskaźnikami są czasy wykonania rejestrowane oddzielnie dla CTT-1 i CTT-2. Ponadto ocenia się, czy badany popełnił błędy w kolejności liczb i kolorów, podejmował próby niewłaściwego łączenia bodźców zakończone autokorektą oraz czy konieczna była podpowiedź od osoby prowadzącej badanie. Wyliczany Wskaźnik Zakłóceń jest informacją wydłużeniu czasu wykonywania CTT-2 w porównaniu z czasem wykonywania CTT-1 (Łojek i Stańczak, 2012).

2.4. Organizacja badań własnych

Badania będące przedmiotem niniejszej pracy były prowadzone w okresie od stycznia 2021 roku do grudnia 2022 roku. Badanie wpisuje się w paradygmat quasi-eksperymentalny (qE). Dobór osób badanych do poszczególnych grup nie spełniał rygoru randomizacji. Jednak, jak podkreśla Krathwohl (1984), tzw. quasi-eksperymenty są użyteczne i popularne. Zastosowany został plan badawczy z jedną grupą eksperymentalną (*experimental group; E*) i dwiema kontrolnymi – kontrolną aktywną (*active control group; K-A*) i kontrolną pasywną (*passive control group, K-P*). Wykonano pomiar początkowy (pre-test) i końcowy (post-test) we wszystkich grupach. Główny czynnik eksperymentalny stanowiła przezczaszkowa stymulacja prądem stałym (tDCS). w tabeli 4 przedstawiono zmienne oraz ich wskaźniki.

Tabela 4

Zmienne oraz ich wskaźniki

Zmienna	Wskaźniki
Zmienna niezależna	
Przeznaczkowa stymulacja prądem stałym (<i>transcranial direct current stimulation; tDCS</i>)	Pomiar wielowartościowy: stymulacja aktywna – 1 (A) stymulacja nieaktywna – (sham; placebo; stymulacja pozorowana) – 2 (P) brak stymulacji – 3 (K)
Zmienne zależne	
Pamięć operacyjna	Suma punktów w zadaniu <i>Klocki Corsiego (Corsi Blocks Test, CBT)</i> Rozpiętość pamięci (czyli liczba poprawnie odtworzonych elementów) w zadaniu <i>Klocki Corsiego (Corsi Blocks Test, CBT)</i> Całkowita liczba poprawnych prób w zadaniu <i>Klocki Corsiego (Corsi Blocks Test, CBT)</i> Liczba poprawnych powtórzeń w zadaniu <i>Powtarzanie cyfr wprost (Digit Span Forward; PC wprost)</i> Liczba poprawnych powtórzeń w zadaniu <i>Powtarzanie cyfr wstak (Digit Span Backward; PC wstak)</i> Procent poprawnie wykonanych ruchów w <i>Teście sortowania kart Berg (Berg's Cards Sorting Test; BCST)</i> Stosunek ruchów wykonanych do minimalnej liczby ruchów w <i>Teście wieży londyńskiej (Tower of London, TOL)</i>
Proces pobudzenia	Liczba poprawnych reakcji w pierwszej części zadania <i>Go/No-Go (GNG)</i> Liczba poprawnych reakcji w drugiej części zadania <i>Go/No-Go (GNG)</i> Suma poprawnych reakcji w zadaniu <i>Go/No-Go (GNG)</i> Średni czas prawidłowej reakcji w zadaniu <i>Go/No-Go (GNG)</i> Liczba opuszczeń w pierwszej części zadania <i>Go/No-Go (GNG)</i> Liczba opuszczeń w drugiej części zadania <i>Go/No-Go (GNG)</i> Suma opuszczeń w zadaniu <i>Go/No-Go (GNG)</i> Czas do wykonania pierwszego ruchu w <i>Teście wieży londyńskiej (Tower of London, TOL)</i> Czas wykonania pierwszej części <i>Testu kolorowych połączeń (CTT-1)</i> Czas wykonania drugiej części <i>Testu kolorowych połączeń (CTT-2)</i>

Zmienna	Wskaźniki
Proces hamowania	<p>Liczba błędnych reakcji w pierwszej części zadania <i>Go/No-Go</i> (GNG)</p> <p>Liczba błędnych reakcji w drugiej części zadania <i>Go/No-Go</i> (GNG)</p> <p>Liczba błędnych reakcji w zadaniu <i>Go/No-Go</i> (GNG)</p> <p>Średni czas błędnej reakcji w zadaniu <i>Go/No-Go</i> (GNG)</p>
Proces kontroli działania	<p>Wskaźnik zakłóceń w <i>Teście kolorowych połączeń</i> (CTT)</p> <p>Procent błędów perseweracyjnych w <i>Teście sortowania kart Berg</i> (<i>Berg's Cards Sorting Test</i>; BCST)</p> <p>Procent błędów nieperseweracyjnych w <i>Teście sortowania kart Berg</i> (<i>Berg's Cards Sorting Test</i>; BCST)</p> <p>Procent reakcji zgodnych z koncepcją logiczną w <i>Teście sortowania kart Berg</i> (<i>Berg's Cards Sorting Test</i>; BCST)</p> <p>Całkowity czas wykonania zadania <i>Testu wieży londyńskiej</i> (<i>Tower of London</i>, TOL)</p> <p>Różnica ruchów wykonanych i minimalnej liczby ruchów w <i>Teście wieży londyńskiej</i> (<i>Tower of London</i>, TOL)</p>
Zmienne kontrolowane	
Wiek	Wiek w latach w ankiecie socjodemograficznej
Płeć	Kobieta, mężczyzna w ankiecie socjodemograficznej

W tabeli 5 przedstawiono schemat badania z podziałem na grupy.

Tabela 5*Schemat badania z podziałem na grupy*

	kwalfikacja oraz 1. pomiar	oddziaływania	2. pomiar (2 tygodnie od 1. pomiaru +/- 3 dni)
Grupa eksperymentalna (E)	– wywiad – ocena funkcji wykonawczych	– stymulacja tDCS (10 spotkań po 30 min w ciągu 2 tygodni; montaż anoda F3, katoda Fp2, 2 mA)	– wywiad – ocena funkcji wykonawczych
Grupa kontrolna aktywna (K-A)	– wywiad – ocena funkcji wykonawczych	– nieaktywna stymulacja tDCS (sham; placebo; stymulacja pozorowana)	– wywiad; – ocena funkcji wykonawczych
Grupa kontrolna pasywna (K-P)	– wywiad; – ocena funkcji wykonawczych	– brak oddziaływań	– wywiad – ocena funkcji wykonawczych

Czas pierwszego i ostatniego spotkania, w trakcie których była przeprowadzana ocena funkcjonowania poznawczego, wynosił ok. 60–90 min. Było to zależne m.in. od tempa pracy badanej osoby. Spotkania, w trakcie których odbywała się stymulacja, były krótsze i trwały ok. 45 min (30 min samej stymulacji, pozostały czas to nawiązanie kontaktu, podłączenie i odłączenie sprzętu). Spotkania odbywały na Wydziale Psychologii UKW lub miejscu dogodnym dla osoby badanej (np. osobne pomieszczenie w miejscu pracy).

Projekt badawczy uzyskał zgodę Komisji Bioetycznej Collegium Medicum Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu (nr zgody: KB 501/2021).

2.5. Charakterystyka osób badanych

W rekrutacji uczestników zastosowano dobór metodą kuli śnieżnej. Informacja o badaniu była umieszczona w mediach społecznościowych, wysyłana drogą mailową oraz przekazywana ustnie wśród osób z otoczenia, z prośbą o przekazanie dalej.

Do badania zakwalifikowano osoby w okresie wczesnej dorosłości, to jest w wieku 20–35 lat (Gurba, 2011). w badaniu wzięło udział 90 osób. Średnia wieku wynosi $M = 27,94$ lat; $SD = 3,92$. Do badania zostały włączone tylko te osoby, które podpisały świadomą zgodę na udział w badaniu oraz o przetwarzaniu danych w celach naukowych (załącznik 1). Uczestnicy badania zostali przydzieleni do jednej z trzech równoważnych grup: eksperymentalnej (E; $n = 30$), kontrolnej aktywnej (K-A; $n = 30$) i kontrolnej pasywnej (K-P; $n = 30$). Równoważność dotyczyła zmiennych płeć oraz wiek. Poniżej opisano kryteria kwalifikacji osób do badania. Pod uwagę wzięto warunki włączenia do badań, wyłączenia z badań oraz usunięcia z badań.

Kryteria włączenia do badań:

- 1) osoby w okresie wczesnej dorosłości, tj. w wieku 20–35 lat;
- 2) udzielenie świadomej, dobrowolnej zgody na udział w badaniu;
- 3) brak innych przeciwwskazań medycznych do przeprowadzenia stymulacji tDCS, tj.: epilepsja, wodogłowie, implanty metalowe w obrębie głowy, nowotwory mózgu, przebyte lub aktualnie leczone, choroba nowotworowa w trakcie leczenia, stymulator serca, ciąża.

Kryteria wyłączenia z badań:

- 1) stwierdzona epilepsja;
- 2) wszczęcie urządzeń takich jak: rozrusznik serca, implant ślimakowy, klipsy chirurgiczne, pompa medyczna;
- 3) cechy uszkodzeń ośrodkowego układu nerwowego w wywiadzie, tj. zaburzenia czucia, spastyczność, porażenie lub niedowład mięśni lub inne, o których informuje osoba badana.

Kryteria usunięcia z badań:

- 1) znaczące pogorszenie stanu zdrowia uniemożliwiające uczestniczenie w badaniu;
- 2) odmowa kontynuacji udziału w badaniu z jakiegokolwiek powodu podawanego przez osobę badaną.

W pierwszym kroku charakterystyki badanych grup przedstawiono dane dotyczące zmiennych socjodemograficznych (tabela 6).

Tabela 6

Charakterystyka osób badanych z podziałem na grupy: eksperymentalna (E), kontrolna aktywna (K-A), kontrolna pasywna (K-P)

	Grupa eksperymentalna		Grupa kontrolna aktywna		Grupa kontrolna pasywna		
Liczba osób badanych	<i>N</i> 30		<i>n</i> 30		<i>N</i> 30		
Wiek	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	
	27,33	4,28	28,03	3,85	27,93	3,96	
	<i>min.</i>	<i>max.</i>	<i>min.</i>	<i>max.</i>	<i>min.</i>	<i>max.</i>	
	21	35	21	35	21	35	
Płeć	<i>n</i>	<i>%</i>	<i>N</i>	<i>%</i>	<i>n</i>	<i>%</i>	
	Kobiety	15	50	15	50	15	50
	Mężczyźni	15	50	15	50	15	50
Wykształcenie	<i>n</i>	<i>%</i>	<i>N</i>	<i>%</i>	<i>n</i>	<i>%</i>	
	Średnie	6	20	5	16,67	3	10
	Wyższe	24	80	25	83,33	27	90
Liczba lat nauki	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	
	16,10	1,44	15,68	1,28	15,5	1,22	

Średnia wieku dla całej próby wynosiła 27,94 lata (SD = 3,92). Natomiast w grupie poddawanej stymulacji średnia wieku wynosiła 27,33 lat (SD = 4,28), w grupie z placebo 28,03 lat (SD = 3,85), a w grupie kontrolnej bez oddziaływań 27,93 lat (SD = 3,96). Każda z grup była równoliczna pod względem kobiet i mężczyzn (po 15 kobiet i 15 mężczyzn). Większość osób badanych miała wykształcenie wyższe. Odpowiednio w grupie aktywnej 24 osoby (80%), w grupie z placebo 25 osób (83,33%), a w grupie bez oddziaływań – 27 osób (90%). Pozostałe osoby miały wykształcenie średnie. Średnia liczba lat nauki w poszczególnych grupach jest podobna i wynosi odpowiednio: 16,10 lat (SD = 1,44) w grupie aktywnej, 15,68 lat (SD = 1,28) w grupie placebo oraz 15,5 lat (SD = 1,22) w grupie kontrolnej bez oddziaływań.

W kolejnym kroku przedstawiono wyniki dotyczące samooceny zdrowia i kondycji umysłowej badanych. Uzyskane dane dla poszczególnych grup zaprezentowano w Tabeli 7.

Tabela 7

Zestawienie samooceny stanu zdrowia i kondycji umysłowej osób badanych z podziałem na grupy: eksperymentalna (E), kontrolna aktywna (K-A), kontrolna pasywna (K-P)

	Grupa eksperymentalna		Grupa kontrolna aktywna		Grupa kontrolna pasywna	
	<i>n</i>	%	<i>N</i>	%	<i>n</i>	%
Ocena stanu zdrowia						
trudno powiedzieć	2	6,67	5	16,67	7	23,33
dobrze	15	50,00	20	66,66	17	56,67
bardzo dobrze	13	43,33	5	16,67	6	20,00
Ocena kondycji umysłowej						
trudno powiedzieć	1	3,33	3	10	7	23,33
dobrze	23	76,67	21	70,00	17	56,67
bardzo dobrze	6	20,00	6	20,00	6	20,00

Zdecydowana większość osób badanych oceniała swój stan zdrowia jako dobry (odpowiednio: w grupie aktywnej 50%, placebo 66,66% i kontrolnej bez oddziaływań 56,67%) lub bardzo dobry (grupa aktywna 43,33%, placebo 16,67% i kontrolna 20%). Nikt z uczestników badania nie określił swojej kondycji zdrowotnej jako zły lub bardzo zły.

Podobnie badani oceniali swoją kondycję umysłową. Zdecydowana większość oceniała ją jako dobrą (76,6% osób z grupy aktywnej, 70% z placebo oraz 56,67% z grupy bez oddziaływań) lub bardzo dobrą (20% z każdej grupy). w trakcie post-testu osoby badane nie uzupełniały ponownie arkusza wywiadu, natomiast osoby z grupy eksperymentalnej i kontrolnej aktywnej były pytane o subiektywne odczucia, czy zauważają zmianę w zakresie kondycji umysłowej/swojego funkcjonowania poznawczego. Zdecydowana większość stwierdziła, że nie widzi różnicy (ani pogorszenia, ani poprawy). Kilka osób, zarówno z grupy eksperymentalnej, jak i otrzymującej placebo, stwierdziło, że zauważa lekką poprawę. Głównie dotyczyło to koncentracji uwagi oraz zapamiętywania.

2.6. Zastosowane procedury statystyczne

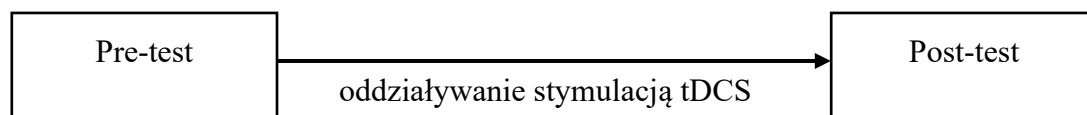
Wyniki przeprowadzonych badań zostały poddane analizie statystycznej w odniesieniu do zaproponowanych hipotez badawczych. Analizy statystyczne wykonano przy użyciu pakietu IBM SPSS Statistics w wersji 25. Przy jego użyciu wykonano analizę podstawowych statystyk

opisowych, ANOVA w schemacie mieszanym, analizy korelacji rho Spearmana, a także testy u Manna Whitneya.

W pierwszej części analiz statystycznych dokonano weryfikacji hipotez dotyczących relacji zmiennej niezależnej (stymulacji tDCS) ze zmienną zależną procesy funkcji wykonawczych. Hipotezy mówiące o wpływie stymulacji tDCS na procesy wykonawcze zostały zweryfikowane za pomocą porównań par wyników pre-test – post-test, zgodnie ze schematem przedstawionym poniżej.

Rysunek 7

Schemat analiz weryfikujących skuteczność stymulacji tDCS



Zebrane dane opracowano przy użyciu statystyk opisowych: wartości średnich, odchyłeń standardowych, skośności, kurtozy. Dokonano analizy rozkładów badanych zmiennych testem normalności Shapiro-Wilka oraz dokonano oceny kształtu rozkładu zmiennej na podstawie histogramów.

Za poziom istotności statystycznej przyjęto klasyczny próg $\alpha = 0,05$. Przy interpretacji siły związku korelacji przyjęto następujący podział: 0,00-0,30 brak korelacji lub bardzo słaba, 0,31-0,5 korelacja umiarkowana, 0,51-0,7 korelacja silna, 0,71-1,00 korelacja bardzo silna. z kolei przy interpretacji wskaźnika wielkości efektu podczas analizy wariancji, czyli eta kwadrat cząstkowe (η^2_p) przyjęto następujący podział: mały efekt dla wartości $>0,01$, średni efekt $>0,06$, natomiast duży efekt $>0,14$.

3. Wyniki

W celu udzielenia odpowiedzi na postawione pytania badawcze i przetestowania postawionych hipotez przeprowadzono analizy statystyczne przy użyciu pakietu IBM SPSS Statistics w wersji 25. Przy jego użyciu wykonano analizę podstawowych statystyk opisowych, ANOVA w schemacie mieszanym, analizy korelacji rho Spearmana, a także testy u Manna Whitneya. Za poziom istotności statystycznej przyjęto klasyczny próg $\alpha = 0,05$.

3.1. Statystyki opisowe

Początkowo sprawdzono rozkłady zmiennych ilościowych. w tym celu obliczono podstawowe statystyki opisowe oraz przeprowadzono test Shapiro-Wilka. Analizy te wykonano przy podziale na warunek badawczy (stymulacja aktywna vs stymulacja sham vs brak oddziaływania oraz pre-test vs post-test). z analiz usunięto obserwacje odstające przekraczające trzecie odchylenie standardowe w obrębie pomiarów przed stymulacją i po stymulacji. Zastąpiono je wartościami minimalnymi lub maksymalnymi zmiennych. Wyniki analizy są przedstawione w tabelach 8–14.

Tabela 8

Statystyki opisowe z wynikami testu Shapiro-Wilka w grupie eksperymentalnej dla pomiaru przed stymulacją

Zmienna zależna	<i>M</i>	<i>Me</i>	<i>SD</i>	<i>Sk.</i>	<i>Kurt.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>W</i>	<i>p</i>
Pamięć operacyjna									
PC: liczba poprawnych powtórzeń wprost	9,27	9,50	1,36	-0,52	0,19	6,00	12,00	0,93	0,042
PC: liczba poprawnych powtórzeń wspank	7,40	7,00	1,33	0,04	-0,86	5,00	10,00	0,93	0,046
CBT: max. długość	6,30	6,00	1,42	0,59	-1,21	5,00	9,00	0,80	<0,001
CBT: suma punktów	53,67	48,00	24,04	0,96	-0,29	30,00	108,00	0,83	<0,001
CBT: całkowita liczba poprawnych prób	8,17	7,50	1,78	0,75	-0,51	6,00	12,00	0,87	0,001
CBT: rozpiętość pamięci	5,08	4,75	0,89	0,75	-0,51	4,00	7,00	0,87	0,001
BCST: poprawne ruchy	82,96	83,53	3,10	-0,77	0,01	75,00	87,20	0,93	0,042
TOL: stosunek ruchy wykonane/ minimalna liczba ruchów	1,20	1,18	0,11	0,45	-0,39	1,02	1,44	0,96	0,269
Proces pobudzenia									
CTT-1: czas WS	37,30	35,00	10,49	1,36	2,04	24,00	67,00	0,88	0,002
CTT-2: czas WS	64,17	62,00	14,15	0,84	0,65	42,00	99,00	0,94	0,098
GNG: poprawne reakcje	292,13	293,50	7,13	-1,64	2,85	272,00	300,00	0,83	<0,001
GNG: średni czas reakcji poprawnej 1	460,35	458,94	25,27	0,28	-1,42	429,78	502,73	0,89	0,004
GNG: średni czas reakcji poprawnej 2	448,68	445,44	24,03	0,24	-0,97	405,42	491,67	0,95	0,200
GNG: reakcje poprawne 1	127,60	128,00	0,62	-1,33	0,83	126,00	128,00	0,66	<0,001
GNG: reakcje poprawne 2	126,63	127,00	0,85	-0,27	-0,33	125,00	128,00	0,87	0,001
GNG: suma opuszczeń	2,37	2,00	2,17	1,72	2,67	0,00	8,00	0,77	<0,001
GNG: liczba opuszczeń 1	0,40	0,00	0,62	1,33	0,83	0,00	2,00	0,66	<0,001
GNG: liczba opuszczeń 2	1,37	1,00	0,85	0,27	-0,33	0,00	3,00	0,87	0,001
TOL: czas do wykonania pierwszego ruchu	10981,17	5973,00	9736,56	1,73	2,42	2578,00	36338,00	0,74	<0,001
Proces hamowania									
GNG: błędne reakcje	27,60	26,50	6,21	1,10	0,92	20,00	43,00	0,89	0,005
GNG: średni czas reakcji błędnej 1	422,33	415,80	27,76	1,30	1,42	391,10	496,60	0,87	0,001
GNG: średni czas reakcji błędnej 2	388,17	382,30	31,51	0,04	0,67	305,75	458,40	0,96	0,269
GNG: błędne reakcje: No Go 1	9,70	10,00	2,58	0,38	-0,29	5,00	15,00	0,96	0,340
GNG: błędne reakcje: No Go 2	15,00	15,00	4,39	0,73	2,17	5,00	28,00	0,94	0,101
Proces kontroli działania									
CTT: wskaźnik zakłóceń	0,77	0,67	0,32	0,80	-0,37	0,40	1,45	0,90	0,007
BCST: błędy perseweracyjne	10,36	9,76	1,39	0,53	-0,98	8,21	13,01	0,92	0,020
BCST: błędy nieperseweracyjne	6,15	5,45	3,06	0,98	0,51	0,81	12,69	0,88	0,003
BCST: reakcje zgodne z koncepcją logiczną	75,33	75,29	3,42	-0,20	-0,02	67,88	81,51	0,95	0,203
TOL: całkowity czas wykonania	185,11	178,26	76,68	1,31	1,74	102,50	391,73	0,86	<0,001
TOL: różnica ruchów wykonanych i minimalnej liczby ruchów	10,67	10,00	5,73	0,44	-0,19	1,00	24,00	0,97	0,478

Adnotacja. Oznaczenia 1 i 2 przy zadaniu GNG oznaczają odpowiednio pierwszą i drugą część zadania

Tabela 9

Statystyki opisowe z wynikami testu Shapiro-Wilka w grupie kontrolnej aktywnej dla pomiaru przed stymulacją

Zmienna zależna	<i>M</i>	<i>Me</i>	<i>SD</i>	<i>Sk.</i>	<i>Kurt.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>W</i>	<i>p</i>
Pamięć operacyjna									
PC: liczba poprawnych powtórzeń wprost	8,73	8,50	1,70	0,04	-1,04	6,00	12,00	0,94	0,077
PC: liczba poprawnych powtórzeń wspank	6,77	7,00	1,36	0,19	-1,07	5,00	9,00	0,90	0,008
CBT: max. długość	6,40	6,00	1,57	0,08	-0,68	3,00	9,00	0,91	0,018
CBT: suma punktów	57,30	54,00	24,54	0,55	0,10	12,00	108,00	0,93	0,053
CBT: całkowita liczba poprawnych prób	8,57	9,00	1,87	-0,43	1,30	4,00	12,00	0,91	0,014
CBT: rozpiętość pamięci	5,28	5,50	0,93	-0,43	1,30	3,00	7,00	0,91	0,014
BCST: poprawne ruchy	84,34	84,03	2,21	-0,49	0,73	78,13	87,90	0,96	0,312
TOL: stosunek ruchy wykonane/ minimalna liczba ruchów	1,19	1,17	0,10	0,43	-0,93	1,04	1,36	0,93	0,036
Proces pobudzania									
CTT-1: czas WS	33,77	32,50	10,26	0,55	-0,34	17,00	59,00	0,96	0,237
CTT-2: czas WS	58,37	55,00	11,41	0,61	-0,63	40,00	81,00	0,93	0,049
GNG: poprawne reakcje	291,93	293,00	7,02	-1,70	3,23	272,00	302,00	0,82	<0,001
GNG: średni czas reakcji poprawnej 1	462,77	458,44	28,29	0,31	-1,50	429,65	511,45	0,88	0,002
GNG: średni czas reakcji poprawnej 2	452,06	446,99	28,24	0,25	-1,34	404,19	500,20	0,92	0,025
GNG: reakcje poprawne 1	127,83	128,00	0,38	-1,88	1,66	127,00	128,00	0,45	<0,001
GNG: reakcje poprawne 2	125,93	126,00	1,01	-0,28	-0,34	124,00	128,00	0,90	0,011
GNG: suma opuszczeń	2,27	2,00	1,28	0,61	-0,29	0,00	5,00	0,90	0,009
GNG: liczba opuszczeń 1	0,17	0,00	0,38	1,88	1,66	0,00	1,00	0,45	<0,001
GNG: liczba opuszczeń 2	2,07	2,00	1,01	0,28	-0,34	0,00	4,00	0,90	0,011
TOL: czas do wykonania pierwszego ruchu	10669,87	6061,50	8166,61	1,59	2,22	2999,00	33372,00	0,79	<0,001
Proces hamowania									
GNG: błędne reakcje	28,07	27,00	7,02	1,70	3,23	18,00	48,00	0,82	<0,001
GNG: średni czas reakcji błędnej 1	422,20	424,83	26,59	0,36	-1,22	390,98	474,71	0,90	0,008
GNG: średni czas reakcji błędnej 2	387,35	382,80	26,09	0,31	-1,41	351,64	437,31	0,90	0,006
GNG: błędne reakcje: No Go 1	9,77	10,00	2,86	0,56	1,50	4,00	17,00	0,92	0,036
GNG: błędne reakcje: No Go 2	15,90	15,00	3,99	1,39	1,69	11,00	26,00	0,85	<0,001
Proces kontroli działania									
CTT: wskaźnik zakłóceń	0,81	0,69	0,45	0,98	0,44	0,27	1,88	0,90	0,008
BCST: błędy perseweracyjne	11,29	11,51	1,81	0,27	-0,63	8,40	15,63	0,96	0,233
BCST: błędy nieperseweracyjne	4,82	4,08	2,82	0,73	-0,21	0,78	11,72	0,93	0,058
BCST: reakcje zgodne z koncepcją logiczną	75,93	75,79	3,53	-0,03	-0,19	68,99	83,19	0,98	0,922
TOL: całkowity czas wykonania	182,02	196,12	60,30	0,36	-0,90	105,70	293,80	0,90	0,008
TOL: różnica ruchów wykonanych i minimalnej liczby ruchów	10,03	9,50	5,39	0,47	-0,83	2,00	20,00	0,93	0,045

Adnotacja. Oznaczenia 1 i 2 przy zadaniu GNG oznaczają odpowiednio pierwszą i drugą część zadania

Tabela 10

Statystyki opisowe z wynikami testu Shapiro-Wilka w grupie kontrolnej aktywnej dla pomiaru przed stymulacją

Zmienna zależna	<i>M</i>	<i>Me</i>	<i>SD</i>	<i>Sk.</i>	<i>Kurt.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>W</i>	<i>p</i>
Pamięć operacyjna									
PC.: liczba poprawnych powtórzeń wprost	8,60	8,00	1,54	0,25	-0,66	6,00	12,00	0,94	0,110
PC: liczba poprawnych powtórzeń wspank	6,60	6,50	1,52	-0,27	0,00	3,00	9,00	0,94	0,071
CBT: max. długość	6,40	6,00	1,33	0,42	-1,39	5,00	9,00	0,82	<0,001
CBT: suma punktów	56,30	51,50	21,18	0,72	-0,51	35,00	108,00	0,87	0,001
CBT: całkowita liczba poprawnych prób	8,53	8,50	1,50	0,62	-0,58	7,00	12,00	0,87	0,001
CBT: rozpiętość pamięci	5,27	5,25	0,75	0,62	-0,58	4,50	7,00	0,87	0,001
BCST: poprawne ruchy	83,71	84,00	2,08	-0,38	-0,55	79,56	86,99	0,96	0,290
TOL: stosunek ruchy wykonane/ minimalna liczba ruchów	1,19	1,18	0,09	0,40	-0,78	1,04	1,35	0,93	0,058
Proces pobudzania									
CTT-1: czas WS	26,53	24,50	7,28	0,72	-0,32	14,00	41,00	0,92	0,023
CTT-2: czas WS	52,97	51,00	10,16	0,59	0,11	36,00	79,00	0,97	0,453
GNG: poprawne reakcje	292,03	293,00	5,92	-1,03	0,56	279,00	301,00	0,89	0,005
GNG: średni czas reakcji poprawnej 1	462,81	449,65	35,47	0,51	-0,99	410,22	532,99	0,92	0,021
GNG: średni czas reakcji poprawnej 2	451,46	435,65	34,68	0,53	-0,99	401,20	521,26	0,91	0,011
GNG: reakcje poprawne 1	127,47	128,00	0,63	-0,76	-0,32	126,00	128,00	0,73	<0,001
GNG: reakcje poprawne 2	125,53	126,00	1,07	-0,54	-0,37	123,00	127,00	0,89	0,003
GNG: suma opuszczeń	3,00	3,00	1,39	0,50	-0,24	1,00	6,00	0,93	0,036
GNG: liczba opuszczeń 1	0,53	0,00	0,63	0,76	-0,32	0,00	2,00	0,73	<0,001
GNG: liczba opuszczeń 2	2,47	2,00	1,07	0,54	-0,37	1,00	5,00	0,89	0,003
TOL: czas do wykonania pierwszego ruchu	11276,40	8219,50	8947,93	1,34	1,19	2599,00	33372,00	0,82	<0,001
Proces hamowania									
GNG: błędne reakcje	27,97	27,00	5,92	1,03	0,56	19,00	41,00	0,89	0,005
GNG: średni czas reakcji błędnej 1	422,19	412,35	32,57	0,61	-0,63	373,30	495,04	0,93	0,058
GNG: średni czas reakcji błędnej 2	387,12	375,46	29,51	0,57	-0,94	348,69	452,99	0,91	0,013
GNG: błędne reakcje: No Go 1	9,47	10,00	3,95	0,94	3,51	0,00	21,00	0,86	0,001
GNG: błędne reakcje: No Go 2	16,47	14,50	5,93	1,74	2,59	11,00	33,00	0,78	<0,001
Proces kontroli działania									
CTT: wskaźnik zakłóceń	1,08	0,96	0,54	0,51	-1,10	0,34	2,05	0,91	0,012
BCST: błędy perseweracyjne	10,36	10,43	1,91	-0,10	0,38	6,25	14,73	0,98	0,850
BCST: błędy nieperseweracyjne	5,65	5,56	2,18	-0,10	-0,04	0,78	9,92	0,97	0,668
BCST: reakcje zgodne z koncepcją logiczną	76,08	76,84	4,19	-0,43	0,08	66,67	84,75	0,97	0,418
TOL: całkowity czas wykonania	185,79	194,12	73,58	0,89	0,70	102,50	391,73	0,89	0,005
TOL: różnica ruchów wykonanych i minimalnej liczby ruchów	10,10	9,00	4,95	0,33	-0,94	2,00	19,00	0,94	0,083

Adnotacja. Oznaczenia 1 i 2 przy zadaniu GNG oznaczają odpowiednio pierwszą i drugą część zadania

Tabela 11

Statystyki opisowe z wynikami testu Shapiro-Wilka w grupie eksperymentalnej dla pomiaru po stymulacji

Zmienna zależna	<i>M</i>	<i>Me</i>	<i>SD</i>	<i>Sk.</i>	<i>Kurt.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>W</i>	<i>p</i>
Pamięć operacyjna [2]									
PC: liczba poprawnych powtórzeń wprost	10,00	10,00	1,08	0,17	-0,44	8,00	12,00	0,92	0,023
PC: liczba poprawnych powtórzeń wspank	7,63	8,00	1,13	0,03	-0,82	6,00	10,00	0,91	0,012
CBT: max. długość	7,23	8,00	1,30	-0,46	-1,04	5,00	9,00	0,86	0,001
CBT: suma punktów	69,53	80,00	22,77	-0,15	-1,44	35,00	108,00	0,90	0,006
CBT: całkowita liczba poprawnych prób	9,47	10,00	1,50	-0,23	-1,34	7,00	12,00	0,88	0,003
CBT: rozpiętość pamięci	5,70	6,00	0,76	-0,11	-1,44	4,50	7,00	0,88	0,002
BCST: poprawne ruchy	87,04	87,80	2,42	-0,24	-0,74	82,64	91,60	0,96	0,264
TOL: stosunek ruchy wykonane/ minimalna liczba ruchów	1,09	1,07	0,06	1,05	0,23	1,02	1,24	0,87	0,002
Proces pobudzania [2]									
CTT-1: czas WS	30,97	31,50	6,48	0,17	-0,65	20,00	43,00	0,97	0,530
CTT-2: czas WS	58,87	59,00	11,10	0,49	0,00	39,00	82,00	0,96	0,267
GNG: poprawne reakcje	300,53	301,00	5,95	-1,53	3,78	283,00	311,00	0,85	<0,001
GNG: średni czas reakcji poprawnej 1	419,81	413,87	29,74	0,63	0,40	361,26	489,50	0,96	0,256
GNG: średni czas reakcji poprawnej 2	414,26	407,90	29,80	0,73	-0,27	365,31	474,67	0,92	0,034
GNG: reakcje poprawne 1	127,83	128,00	0,38	-1,88	1,66	127,00	128,00	0,45	<0,001
GNG: reakcje poprawne 2	127,00	127,00	0,91	-0,59	-0,36	125,00	128,00	0,85	<0,001
GNG: suma opuszczeń	1,27	1,00	1,11	0,72	-0,18	0,00	4,00	0,87	0,001
GNG: liczba opuszczeń 1	0,20	0,00	0,47	2,09	2,94	0,00	1,50	0,48	<0,001
GNG: liczba opuszczeń 2	1,00	1,00	0,91	0,59	-0,36	0,00	3,00	0,85	<0,001
TOL: czas do wykonania pierwszego ruchu	9051,17	5479,00	7837,07	1,77	2,49	2191,00	30367,00	0,74	<0,001
Proces hamowania [2]									
GNG: błędne reakcje	19,47	19,00	5,95	1,53	3,78	9,00	37,00	0,85	<0,001
GNG: średni czas reakcji błędnej 1	393,96	388,97	26,41	1,03	0,85	351,76	457,19	0,91	0,015
GNG: średni czas reakcji błędnej 2	365,46	356,04	35,61	0,95	0,21	327,39	458,40	0,90	0,007
GNG: błędne reakcje: No Go 1	5,57	5,00	2,75	1,19	1,85	2,00	13,00	0,89	0,004
GNG: błędne reakcje: No Go 2	12,77	13,00	2,79	0,67	0,25	9,00	20,00	0,94	0,097
Proces kontroli działania [2]									
CTT: wskaźnik zakłóceń	0,91	0,90	0,27	0,46	-0,29	0,47	1,50	0,96	0,358
BCST: błędy perseweracyjne	8,82	8,81	1,34	0,10	0,34	5,83	11,61	0,98	0,742
BCST: błędy nieperseweracyjne	4,06	3,31	2,16	0,93	0,34	0,84	9,84	0,92	0,025
BCST: reakcje zgodne z koncepcją logiczną	84,14	84,29	4,16	-0,46	-0,32	75,38	91,15	0,97	0,443
TOL: całkowity czas wykonania	146,20	126,54	45,14	1,24	0,99	100,50	265,16	0,85	<0,001
TOL: różnica ruchów wykonanych i minimalnej liczby ruchów	4,70	4,00	3,16	0,99	0,08	1,00	12,00	0,88	0,002

Adnotacja. Oznaczenia 1 i 2 przy zadaniu GNG oznaczają odpowiednio pierwszą i drugą część zadania

Tabela 12

Statystyki opisowe z wynikami testu Shapiro-Wilka w grupie kontrolnej aktywnej dla pomiaru po stymulacji

Zmienna zależna	<i>M</i>	<i>Me</i>	<i>SD</i>	<i>Sk.</i>	<i>Kurt.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>W</i>	<i>p</i>
Pamięć operacyjna [2]									
PC: liczba poprawnych powtórzeń wprost	9,13	9,00	1,41	-0,09	-0,40	6,00	12,00	0,95	0,188
PC: liczba poprawnych powtórzeń wspan	6,80	7,00	1,27	0,29	-0,77	5,00	9,00	0,91	0,012
CBT: max. długość	6,67	6,00	1,12	0,10	-1,53	5,00	8,00	0,80	<0,001
CBT: suma punktów	61,30	54,00	17,58	0,31	-1,18	35,00	88,00	0,88	0,002
CBT: całkowita liczba poprawnych prób	9,07	9,00	1,20	0,12	-0,58	7,00	11,00	0,90	0,011
CBT: rozpiętość pamięci	5,53	5,50	0,60	0,12	-0,58	4,50	6,50	0,90	0,011
BCST: poprawne ruchy	83,55	83,83	1,75	-0,83	1,06	78,46	86,21	0,95	0,191
TOL: stosunek ruchy wykonane/ minimalna liczba ruchów	1,15	1,15	0,10	0,49	-0,36	1,00	1,35	0,94	0,121
Proces pobudzenia [2]									
CTT-1: czas WS	31,63	29,00	9,71	1,09	0,73	19,00	59,00	0,90	0,009
CTT-2: czas WS	58,47	55,00	11,16	0,53	-0,91	43,00	81,00	0,92	0,023
GNG: poprawne reakcje	292,87	294,00	5,72	-1,59	2,94	277,00	302,00	0,83	<0,001
GNG: średni czas reakcji poprawnej 1	428,03	422,91	24,30	0,39	-1,13	393,41	472,81	0,93	0,051
GNG: średni czas reakcji poprawnej 2	418,12	414,02	24,38	0,25	-0,76	369,80	462,41	0,96	0,342
GNG: reakcje poprawne 1	127,73	128,00	0,45	-1,11	-0,82	127,00	128,00	0,55	<0,001
GNG: reakcje poprawne 2	126,13	126,00	0,68	0,53	1,02	125,00	128,00	0,80	<0,001
GNG: suma opuszczeń	2,17	2,00	0,91	-0,06	0,19	0,00	4,00	0,90	0,008
GNG: liczba opuszczeń 1	0,27	0,00	0,45	1,11	-0,82	0,00	1,00	0,55	<0,001
GNG: liczba opuszczeń 2	1,87	2,00	0,68	-0,53	1,02	0,00	3,00	0,80	<0,001
TOL: czas do wykonania pierwszego ruchu	8396,80	5212,89	5697,81	1,45	1,81	2579,14	24266,06	0,82	<0,001
Proces hamowania [2]									
GNG: błędne reakcje	27,13	26,00	5,72	1,59	2,94	18,00	43,00	0,83	<0,001
GNG: średni czas reakcji błędnej 1	396,93	391,01	24,19	0,47	-0,92	366,83	449,17	0,93	0,051
GNG: średni czas reakcji błędnej 2	358,27	353,13	22,72	0,47	-1,04	328,50	405,07	0,93	0,036
GNG: błędne reakcje: No Go 1	8,93	9,00	2,66	0,86	1,95	4,00	16,00	0,91	0,011
GNG: błędne reakcje: No Go 2	16,07	15,50	3,76	1,48	2,78	10,00	27,00	0,86	<0,001
Proces kontroli działania [2]									
CTT: wskaźnik zakłóceń	0,95	0,86	0,48	0,70	-0,45	0,28	2,00	0,93	0,046
BCST: błędy perseweracyjne	11,26	11,02	2,09	0,37	-0,37	7,50	16,15	0,97	0,660
BCST: błędy nieperseweracyjne	4,89	4,94	2,04	0,91	1,08	1,69	10,16	0,93	0,056
BCST: reakcje zgodne z koncepcją logiczną	76,41	76,70	3,01	0,29	0,88	70,37	84,48	0,98	0,772
TOL: całkowity czas wykonania	179,72	192,18	63,48	0,83	0,72	102,51	360,39	0,91	0,011
TOL: różnica ruchów wykonanych i minimalnej liczby ruchów	10,00	9,50	5,11	0,40	-0,81	2,00	19,00	0,94	0,083

Adnotacja. Oznaczenia 1 i 2 przy zadaniu GNG oznaczają odpowiednio pierwszą i drugą część zadania

Tabela 13

Statystyki opisowe z wynikami testu Shapiro-Wilka w grupie kontrolnej pasywnej dla pomiaru po stymulacji

Zmienna zależna	<i>M</i>	<i>Me</i>	<i>SD</i>	<i>Sk.</i>	<i>Kurt.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>W</i>	<i>p</i>
Pamięć operacyjna [2]									
PC: liczba poprawnych powtórzeń wprost	8,67	8,00	1,49	0,22	-0,45	6,00	12,00	0,94	0,115
PC: liczba poprawnych powtórzeń wspan	6,53	6,00	1,43	0,15	-0,33	4,00	9,00	0,91	0,015
CBT: max. długość	6,50	6,00	1,33	0,09	-1,83	5,00	8,00	0,76	<0,001
CBT: suma punktów	58,23	54,00	20,63	0,21	-1,62	35,00	88,00	0,84	<0,001
CBT: całkowita liczba poprawnych prób	8,70	9,00	1,44	0,20	-1,32	7,00	11,00	0,88	0,002
CBT: rozpiętość pamięci	5,35	5,50	0,72	0,20	-1,32	4,50	6,50	0,88	0,002
BCST: poprawne ruchy	83,65	83,60	2,09	0,15	-0,65	79,55	87,83	0,98	0,687
TOL: stosunek ruchy wykonane/ minimalna liczba ruchów	1,15	1,13	0,06	0,36	-1,12	1,05	1,25	0,93	0,046
Proces pobudzenia [2]									
CTT-1: czas WS	25,93	24,00	5,90	0,61	-0,42	15,00	38,00	0,93	0,045
CTT-2: czas WS	53,47	51,50	9,05	0,84	0,77	39,00	79,00	0,95	0,144
GNG: poprawne reakcje	292,80	293,00	4,76	-0,64	0,07	283,00	301,00	0,94	0,081
GNG: średni czas reakcji poprawnej 1	425,89	426,09	26,77	0,64	-0,19	390,54	485,99	0,94	0,076
GNG: średni czas reakcji poprawnej 2	415,43	413,41	25,83	0,68	-0,10	382,73	475,30	0,93	0,054
GNG: reakcje poprawne 1	127,87	128,00	0,35	-2,27	3,39	127,00	128,00	0,40	<0,001
GNG: reakcje poprawne 2	125,97	126,00	0,96	-0,18	-0,28	124,00	128,00	0,91	0,013
GNG: suma opuszczeń	2,20	2,00	1,16	0,44	-0,12	0,00	5,00	0,92	0,035
GNG: liczba opuszczeń 1	0,13	0,00	0,35	2,27	3,39	0,00	1,00	0,40	<0,001
GNG: liczba opuszczeń 2	2,03	2,00	0,96	0,18	-0,28	0,00	4,00	0,91	0,013
TOL: czas do wykonania pierwszego ruchu	9759,91	7068,50	7620,77	1,43	1,67	2235,00	30702,00	0,84	<0,001
Proces hamowania [2]									
GNG: błędne reakcje	27,20	27,00	4,76	0,64	0,07	19,00	37,00	0,94	0,081
GNG: średni czas reakcji błędnej 1	391,41	388,81	25,86	0,67	-0,24	357,66	450,95	0,94	0,091
GNG: średni czas reakcji błędnej 2	356,26	355,78	22,52	0,62	-0,21	326,10	412,64	0,95	0,143
GNG: błędne reakcje: No Go 1	9,13	9,00	3,73	1,30	3,82	2,00	20,00	0,83	<0,001
GNG: błędne reakcje: No Go 2	16,63	15,00	4,11	1,37	1,73	10,00	27,00	0,84	<0,001
Proces kontroli działania [2]									
CTT: wskaźnik zakłóceń	1,11	1,02	0,48	0,47	-0,87	0,39	2,00	0,94	0,083
BCST: błędy perseweracyjne	11,11	10,93	1,88	0,07	0,73	6,25	15,20	0,97	0,413
BCST: błędy nieperseweracyjne	5,03	5,15	1,77	-0,16	-0,34	1,63	8,73	0,97	0,652
BCST: reakcje zgodne z koncepcją logiczną	76,34	76,89	3,20	-0,63	-0,19	69,47	81,60	0,95	0,141
TOL: całkowity czas wykonania	181,95	195,03	65,20	0,59	-0,25	100,45	336,89	0,91	0,013
TOL: różnica ruchów wykonanych i minimalnej liczby ruchów	7,77	7,00	3,27	0,46	-0,89	3,00	14,00	0,93	0,064

Adnotacja. Oznaczenia 1 i 2 przy zadaniu GNG oznaczają odpowiednio pierwszą i drugą część zadania

Wyniki testów Shapiro-Wilka wskazują na niespełnienie założenia o rozkładzie normalnym dla większości zmiennych. Jednocześnie dla prawie każdej zmiennej uzyskano wartości skośności nieprzekraczającej bezwzględnej wartości 2, a dla kurtozy wartości 7. To z kolei nie wskazuje na znaczny poziom asymetrii rozkładów. Wyjątek stanowią opuszczenia 1 P i liczba poprawnych reakcji w pierwszej części zadania Go/No-Go. Jednak ze względu na usunięcie obserwacji odstających zdecydowano wykonać analizy parametryczne.

W dalszym kroku sprawdzono, czy rozkłady zmian w pomiarach są zbliżone do krzywej Gaussa. Analogicznie jak poprzednio wykonano analizy przy podziale na warunek badawczy. Wyniki tych analiz zawarto w tabelach 14–16.

Tabela 14

Statystyki opisowe z wynikami testu Shapiro-Wilka w grupie eksperymentalnej dla różnic pomiarów

Różnice pomiarów	<i>M</i>	<i>Me</i>	<i>SD</i>	<i>Sk.</i>	<i>Kurt.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>W</i>	<i>p</i>
Pamięć operacyjna									
PC: liczba poprawnych powtórzeń wprost	0,73	0,00	1,05	0,77	-0,46	-1,00	3,00	0,81	<0,001
PC: liczba poprawnych powtórzeń wspan	0,23	0,00	0,77	-0,44	1,68	-2,00	2,00	0,83	<0,001
CBT: max. długość	0,93	1,00	1,05	1,10	1,03	0,00	4,00	0,81	<0,001
CBT: suma punktów	15,87	11,50	18,61	1,09	0,48	-9,00	64,00	0,87	0,001
CBT: całkowita liczba poprawnych prób	1,30	1,00	1,51	0,92	0,08	-1,00	5,00	0,87	0,002
CBT: rozpiętość pamięci	0,62	0,50	0,76	1,02	0,18	-0,50	2,50	0,85	<0,001
BCST: poprawne ruchy	4,09	4,37	3,32	-0,32	-0,70	-3,02	9,67	0,97	0,555
TOL: stosunek ruchy wykonane/ minimalna liczba ruchów	0,11	0,11	0,09	0,65	0,68	-0,05	0,34	0,96	0,331
Proces pobudzenia									
CTT-1: czas WS	5,93	5,00	4,68	1,32	3,45	0,00	22,00	0,90	0,007
CTT-2: czas WS	5,80	7,00	7,79	0,97	3,70	-11,00	32,00	0,92	0,020
GNG: poprawne reakcje	9,67	9,00	10,32	1,79	6,60	-10,00	49,00	0,86	<0,001
GNG: średni czas reakcji poprawnej 1	42,99	39,55	42,84	2,13	8,77	-41,60	214,96	0,78	<0,001
GNG: średni czas reakcji poprawnej 2	30,28	38,45	36,69	-1,62	6,34	-107,27	99,71	0,84	<0,001
GNG: reakcje poprawne 1	-2,90	0,00	15,33	-5,46	29,88	-84,00	2,00	0,21	<0,001
GNG: reakcje poprawne 2	-0,47	-1,00	1,41	0,13	0,87	-4,00	3,00	0,94	0,114
GNG: suma opuszczeń	3,70	1,00	14,91	5,33	28,92	-3,00	82,00	0,28	<0,001
GNG: liczba opuszczeń 1	2,90	0,00	15,33	5,46	29,88	-2,00	84,00	0,21	<0,001
GNG: liczba opuszczeń 2	0,47	1,00	1,41	-0,13	0,87	-3,00	4,00	0,94	0,114
TOL: czas do wykonania pierwszego ruchu	2208,93	1080,50	3203,65	2,38	6,50	-961,00	14339,00	0,73	<0,001
Proces hamowania									
GNG: błędne reakcje	10,33	9,00	12,06	2,32	8,72	-10,00	59,00	0,80	<0,001
GNG: średni czas reakcji błędnej 1	27,06	26,53	25,34	0,22	0,93	-36,69	82,24	0,96	0,368
GNG: średni czas reakcji błędnej 2	28,32	23,85	33,28	1,77	4,56	-19,10	146,35	0,84	<0,001
GNG: błędne reakcje: No Go 1	4,17	4,50	4,47	-0,64	0,90	-8,00	13,00	0,96	0,370
GNG: błędne reakcje: No Go 2	2,47	2,50	5,22	-1,08	3,19	-15,00	11,00	0,93	0,037
Proces kontroli działania									
CTT: wskaźnik zakłóceń	-0,14	-0,13	0,18	-0,17	0,19	-0,54	0,20	0,97	0,672
BCST: błędy perseweracyjne	1,83	1,73	2,23	1,70	6,17	-2,14	10,27	0,87	0,001
BCST: błędy nieperseweracyjne	2,09	1,54	3,67	0,45	-0,34	-4,84	9,30	0,96	0,278
BCST: reakcje zgodne z koncepcją logiczną	8,99	9,31	4,65	0,12	0,31	-1,02	20,54	0,99	0,993
TOL: całkowity czas wykonania	38,91	23,55	48,98	1,52	1,92	-25,10	182,22	0,83	<0,001
TOL: różnica ruchów wykonanych i minimalnej liczby ruchów	5,83	6,00	4,65	0,71	0,66	-2,00	17,00	0,94	0,070

Adnotacja. Oznaczenia 1 i 2 przy zadaniu GNG oznaczają odpowiednio pierwszą i drugą część zadania

Tabela 15

Statystyki opisowe z wynikami testu Shapiro-Wilka w grupie kontrolnej aktywnej dla różnic pomiarów

Różnice pomiarów	<i>M</i>	<i>Me</i>	<i>SD</i>	<i>Sk.</i>	<i>Kurt.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>W</i>	<i>p</i>
Pamięć operacyjna									
PC: liczba poprawnych powtórzeń wprost	0,40	0,00	0,81	1,99	3,08	0,00	3,00	0,56	<0,001
PC: liczba poprawnych powtórzeń wstak	0,03	0,00	0,49	0,09	1,74	-1,00	1,00	0,66	<0,001
CBT: max. długość	0,27	0,00	1,01	1,11	0,88	-1,00	3,00	0,78	<0,001
CBT: suma punktów	4,00	0,00	14,08	0,59	0,82	-20,00	38,00	0,89	0,005
CBT: poprawne próby	0,50	0,00	1,36	1,81	4,10	-1,00	5,00	0,78	<0,001
CBT: rozpiętość pamięci	0,25	0,00	0,68	1,81	4,10	-0,50	2,50	0,78	<0,001
BCST: poprawne ruchy	-0,80	-0,75	1,63	-0,33	-0,31	-4,66	1,91	0,98	0,790
TOL: stosunek ruchy wykonane /minimalna liczba ruchów	0,04	0,00	0,05	0,49	-1,28	-0,03	0,15	0,78	<0,001
Proces pobudzenia									
CTT-1 czas WS	2,13	0,00	4,92	2,80	8,89	-2,00	22,00	0,57	<0,001
CTT-2 czas WS	-0,10	0,00	3,60	0,02	1,27	-9,00	9,00	0,93	0,058
GNG: poprawne reakcje	0,93	1,00	1,70	0,70	0,43	-2,00	5,00	0,93	0,040
GNG: średni czas reakcji poprawnej 1	34,75	33,60	10,89	1,68	4,52	18,91	73,76	0,87	0,001
GNG: średni czas reakcji poprawnej 2	33,94	32,73	10,64	1,69	4,58	18,55	72,13	0,87	0,001
GNG: reakcje poprawne 1	0,10	0,00	0,48	0,32	1,60	-1,00	1,00	0,65	<0,001
GNG: reakcje poprawne 2	-0,20	0,00	0,96	0,18	-0,31	-2,00	2,00	0,91	0,013
GNG: suma opuszczeń	0,10	0,00	1,18	-0,47	0,26	-3,00	2,00	0,92	0,031
GNG: liczba opuszczeń 1	-0,10	0,00	0,48	-0,32	1,60	-1,00	1,00	0,65	<0,001
GNG: liczba opuszczeń 2	0,20	0,00	0,96	-0,18	-0,31	-2,00	2,00	0,91	0,013
TOL: czas do wykonania pierwszego ruchu	2367,94	848,61	2875,16	2,12	4,33	419,86	11951,94	0,67	<0,001
Proces hamowania									
GNG: błędne reakcje	0,93	1,00	1,70	0,70	0,43	-2,00	5,00	0,93	0,040
GNG: średni czas reakcji błędnej 1	25,28	24,45	11,94	1,37	2,61	10,27	64,17	0,88	0,002
GNG: średni czas reakcji błędnej 2	29,09	28,05	9,16	1,67	4,57	15,79	61,96	0,87	0,001
GNG: błędne reakcje: No Go 1	0,83	1,00	0,95	0,35	-0,62	-1,00	3,00	0,88	0,002
GNG: błędne reakcje: No Go 2	0,00	0,00	1,51	0,06	1,63	-4,00	4,00	0,94	0,092
Proces kontroli działania									
CTT wskaźnik zakłóceń	-0,12	0,00	0,30	-2,10	6,52	-1,28	0,35	0,79	<0,001
BCST: błędy perseweracyjne	0,03	0,06	2,13	-0,46	0,66	-6,00	3,49	0,96	0,254
BCST: błędy nieperseweracyjne	-0,07	-0,74	2,98	0,29	0,24	-6,75	6,33	0,96	0,320
BCST: reakcje zgodne z koncepcją logiczną	0,49	0,56	2,77	-0,65	0,60	-6,85	5,33	0,97	0,530
TOL: całkowity czas wykonania próby	5,56	4,12	7,01	1,79	5,61	-6,83	31,34	0,85	<0,001
TOL: różnica pomiędzy ruchami wykonanymi a najmniejszą liczbą ruchów	0,03	0,00	0,85	3,18	18,23	-2,00	4,00	0,37	<0,001

Adnotacja. Oznaczenia 1 i 2 przy zadaniu GNG oznaczają odpowiednio pierwszą i drugą część zadania

Tabela 16

Statystyki opisowe z wynikami testu Shapiro-Wilka w grupie kontrolnej pasywnej dla różnic pomiarów

Różnice pomiarów	<i>M</i>	<i>Me</i>	<i>SD</i>	<i>Sk.</i>	<i>Kurt.</i>	<i>Min.</i>	<i>Maks.</i>	<i>W</i>	<i>p</i>
Pamięć operacyjna									
PC: liczba poprawnych powtórzeń wprost	0,07	0,00	0,25	3,66	12,21	0,00	1,00	0,28	<0,001
PC: liczba poprawnych powtórzeń wspank	-0,07	0,00	0,58	-2,24	7,85	-2,00	1,00	0,47	<0,001
CBT: max. długość	0,10	0,00	0,84	2,01	5,21	-1,00	3,00	0,60	<0,001
CBT: suma punktów	1,93	0,00	11,57	1,98	6,73	-20,00	45,00	0,65	<0,001
CBT: całkowita liczba poprawnych prób	0,17	0,00	0,79	1,92	5,61	-1,00	3,00	0,66	<0,001
CBT: rozpiętość pamięci	0,08	0,00	0,40	1,92	5,61	-0,50	1,50	0,66	<0,001
BCST: poprawne ruchy	-0,07	0,16	1,87	0,41	0,89	-3,26	5,24	0,95	0,171
TOL: stosunek ruchy wykonane/ minimalna liczba ruchów	0,04	0,04	0,06	0,68	1,27	-0,05	0,23	0,95	0,170
Proces pobudzenia									
CTT-1: czas WS	0,50	0,00	2,32	1,62	3,87	-4,00	8,00	0,74	<0,001
CTT-2: czas WS	-0,50	0,00	2,94	0,91	3,19	-6,00	9,00	0,90	0,006
GNG: poprawne reakcje	0,70	0,00	1,42	1,74	3,07	-1,00	5,00	0,76	<0,001
GNG: średni czas reakcji poprawnej 1	36,92	37,31	15,06	-1,07	1,32	-7,95	58,25	0,92	0,024
GNG: średni czas reakcji poprawnej 2	36,04	36,49	14,76	-1,06	1,27	-7,77	56,97	0,92	0,026
GNG: reakcje poprawne 1	-0,37	0,00	0,49	-0,58	-1,78	-1,00	0,00	0,61	<0,001
GNG: reakcje poprawne 2	-0,43	0,00	0,63	-0,27	-0,01	-2,00	1,00	0,79	<0,001
GNG: suma opuszczeń	0,80	1,00	0,81	0,39	1,09	-1,00	3,00	0,86	<0,001
GNG: liczba opuszczeń 1	0,37	0,00	0,49	0,58	-1,78	0,00	1,00	0,61	<0,001
GNG: liczba opuszczeń 2	0,43	0,00	0,63	0,27	-0,01	-1,00	2,00	0,79	<0,001
TOL: czas do wykonania pierwszego ruchu	1516,49	995,61	1606,28	1,52	1,89	-179,19	5843,00	0,83	<0,001
Proces hamowania									
GNG: błędne reakcje	0,70	0,00	1,42	1,74	3,07	-1,00	5,00	0,76	<0,001
GNG: średni czas reakcji błędnej 1	30,78	31,72	14,28	-0,89	0,52	-7,63	47,96	0,92	0,024
GNG: średni czas reakcji błędnej 2	30,86	31,16	12,62	-1,06	1,32	-6,75	48,64	0,92	0,029
GNG: błędne reakcje: No Go 1	0,27	0,00	0,91	-0,28	0,28	-2,00	2,00	0,90	0,006
GNG: błędne reakcje: No Go 2	-0,37	-1,00	1,97	1,36	3,19	-4,00	6,00	0,88	0,002
Proces kontroli działania									
CTTL wskaźnik zakłóceń	-0,03	-0,05	0,19	1,88	6,49	-0,37	0,69	0,82	<0,001
BCST: błędy perseweracyjne	-0,75	-0,52	2,36	0,19	0,83	-6,04	5,71	0,97	0,491
BCST: błędy nieperseweracyjne	0,61	0,91	2,42	-0,04	0,77	-4,96	6,72	0,98	0,720
BCST: reakcje zgodne z koncepcją logiczną	0,26	0,55	2,05	0,20	1,69	-4,59	6,14	0,96	0,404
TOL: całkowity czas wykonania	3,84	2,21	11,20	3,42	15,16	-9,51	54,84	0,65	<0,001
TOL: różnica ruchów wykonanych i minimalnej liczby ruchów	2,33	2,00	2,93	0,61	1,21	-2,00	11,00	0,94	0,066

Adnotacja. Oznaczenia 1 i 2 przy zadaniu GNG oznaczają odpowiednio pierwszą i drugą część zadania

Ze względu na niespełnienie założenia dotyczącego normalności rozkładu oraz obecności licznych obserwacji odstających w każdej podgrupie tę część analiz zdecydowano się przeprowadzić przy użyciu testów nieparametrycznych.

3.2. Wpływ stymulacji tDCS na funkcje wykonawcze (różnice w funkcjach wykonawczych w zależności od warunku badawczego)

Chcąc sprawdzić, czy przezczaszkowa stymulacja prądem stałym (tDCS) w montażu anoda F3, katoda Fp2, wpływa na funkcje wykonawcze u zdrowych osób w okresie wczesnej dorosłości wykonano serie ANOVA w schemacie mieszanym 2 (pomiar: przed i po) × 3 (grupa: eksperymentalna, kontrolna aktywna, kontrolna pasywna). Czynnikiem wewnątrzobiektywnym był podwójny pomiar funkcji wykonawczych, zaś czynnikiem międzyobiektywnym – grupa.

Początkowo sprawdzono wyniki dla pamięci operacyjnej. w tabeli 17 zaprezentowano wyniki testów, zaś w tabelach 18 – 19 statystyki opisowe dla efektów.

Tabela 17

Różnice w zakresie pamięci operacyjnej w zależności od warunku badawczego

Czynnik wewnątrzobiektywny	<i>F</i> (1,87)	<i>p</i>	η^2_p	Różnice
Powtarzanie cyfr wprost	23,67	<0,001	0,22	P 1 < P 2
Powtarzanie cyfr wspak	1,02	0,316	0,01	-
CBT: max. długość	17,84	<0,001	0,17	P 1 < P 2
CBT: suma punktów	21,01	<0,001	0,20	P 1 < P 2
CBT: poprawne próby	24,39	<0,001	0,22	P 1 < P 2
CBT: rozpiętość pamięci	22,59	<0,001	0,26	P 1 < P 2
BCST: poprawne ruchy	18,18	<0,001	0,17	P 1 < P 2
TOL: stosunek ruchy wykonane/ minimalna liczba ruchów	81,79	<0,001	0,49	P 1 > P 2

Czynnik międzyobiektywny	<i>F</i> (2,87)	<i>p</i>	η^2_p	Różnice: testy <i>post hoc</i>
Powtarzanie cyfr wprost	4,08	0,020	0,07	G KP < G E
Powtarzanie cyfr wspak	4,34	0,016	0,09	G KP < G E
CBT: max. długość	0,51	0,604	0,01	-
CBT: suma punktów	0,33	0,718	0,01	-
CBT: poprawne próby	0,20	0,824	<0,01	-
CBT: rozpiętość pamięci	0,17	0,846	<0,01	-
BCST: poprawne ruchy	3,73	0,028	0,08	G KP < G E
TOL: stosunek ruchy wykonane/ minimalna liczba ruchów	0,84	0,436	0,02	-

Interakcja	<i>F</i> (2,87)	<i>p</i>	η^2_p	Testy <i>post hoc</i>	
				Różnice wewnątrz grup	Różnice pomiędzy grupami
Powtarzanie cyfr wprost*Grupa	5,48	0,006	0,11	G E, G KA: P 1 < P 2	P2: G E > G KA, G KP
Powtarzanie cyfr wspak*Grupa	1,78	0,175	0,04	-	-
CBT: max. długość*Grupa	6,16	0,003	0,12	G E: P 1 < P 2	-
CBT: suma punktów*Grupa	7,50	0,001	0,15	G E: P 1 < P 2	-
CBT: poprawne próby*Grupa	6,42	0,003	0,13	G E, G KA: P 1 < P 2	-
CBT: rozpiętość pamięci*Grupa	5,59	0,005	0,11	G E, G KA: P 1 < P 2	-
BCST: poprawne ruchy*Grupa	36,34	<0,001	0,46	G E: P 1 < P 2	P2: G E > G KA, G KP
TOL: stosunek ruchy wykonane/ minimalna liczba ruchów*Grupa	10,72	<0,001	0,20	G E, G KA, G KP: P 1 > P 2	P2: G E > G KA, G KP

Adnotacja. P – pomiar; G E – grupa eksperymentalna, G KA – grupa kontrolna aktywna, G KP – grupa kontrolna pasywna. w tabeli przedstawiono różnice istotne na poziomie $p < 0,05$, w przypadku testów *post hoc* porównania wykonano z poprawką Bonferroniego.

Tabela 18*Statystyki opisowe dla powtarzania cyfr oraz CBT w zależności od pomiaru i grupy*

Grupa	Pomiar	Powtarzanie cyfr wprost		Powtarzanie cyfr wspak		CBT: max. długość		CBT: suma punktów		CBT: poprawne próby		CBT: rozpiętość pamięci	
		<i>M</i>	<i>SD*</i>	<i>M</i>	<i>SD*</i>	<i>M</i>	<i>SD*</i>	<i>M</i>	<i>SD*</i>	<i>M</i>	<i>SD*</i>	<i>M</i>	<i>SD*</i>
G E	P 1	9,27	1,36	7,40	1,33	6,30	1,42	53,67	24,04	8,17	1,78	5,08	0,89
	P 2	10,00	1,08	7,63	1,13	7,23	1,30	69,53	22,77	9,47	1,50	5,70	0,76
	Ogółem	9,63	0,25	7,52	0,24	6,77	0,23	61,60	3,76	8,82	0,26	5,39	0,13
G KA	P 1	8,73	1,70	6,77	1,36	6,40	1,57	57,30	24,54	8,57	1,87	5,28	0,93
	P 2	9,13	1,41	6,80	1,27	6,67	1,12	61,30	17,58	9,07	1,20	5,53	0,60
	Ogółem	8,93	0,25	6,78	0,24	6,53	0,23	59,30	3,76	8,82	0,26	5,41	0,13
G KP	P 1	8,60	1,54	6,60	1,52	6,40	1,33	56,30	21,18	8,53	1,50	5,27	0,75
	P 2	8,67	1,49	6,53	1,43	6,50	1,33	58,23	20,63	8,70	1,44	5,35	0,72
	Ogółem	8,63	0,25	6,57	0,24	6,45	0,23	57,27	3,76	8,62	0,26	5,31	0,13
Ogółem	P 1	8,87	1,55	6,92	1,43	6,37	1,43	55,76	23,09	8,42	1,72	5,21	0,86
	P 2	9,27	1,44	6,99	1,35	6,80	1,28	63,02	20,77	9,08	1,41	5,53	0,70

Adnotacja. P – pomiar, G E – grupa eksperymentalna, G KA – grupa kontrolna aktywna, G KP – grupa kontrolna pasywna; * – dla statystyk dotyczących efektów czynnika międzyobiektowego w tabeli przedstawiono błąd standardowy (*SE*) zamiast odchylenia standardowego (*SD*).

Tabela 19*Statystyki opisowe dla BCST: poprawne ruchy oraz TOL: stosunku ruchów wykonanych do minimalnej liczby ruchów w zależności od pomiaru i grupy*

Grupa	Pomiar	BCST: poprawne ruchy		TOL: stosunek ruchy wykonane/minimalna liczba ruchów	
		<i>M</i>	<i>SD*</i>	<i>M</i>	<i>SD*</i>
G E	P 1	82,96	3,10	1,20	0,11
	P 2	87,04	2,42	1,09	0,06
	Ogółem	85,00	0,36	1,15	0,02
G KA	P 1	84,34	2,21	1,19	0,10
	P 2	83,55	1,75	1,15	0,10
	Ogółem	83,94	0,36	1,17	0,02
G KP	P 1	83,71	2,08	1,19	0,09
	P 2	83,65	2,09	1,15	0,06
	Ogółem	83,68	0,36	1,17	0,02
Ogółem	P 1	83,67	2,54	1,19	0,10
	P 2	84,75	2,65	1,13	0,08

Adnotacja. P – pomiar, G E – grupa eksperymentalna, G KA – grupa kontrolna aktywna, G KP – grupa kontrolna pasywna; * – dla statystyk dotyczących efektów czynnika międzyobiektowego w tabeli przedstawiono błąd standardowy (*SE*) zamiast odchylenia standardowego (*SD*).

Z przeprowadzonej analizy wynika, że efekty wewnątrzobiektywne pomiaru okazały się istotne statystycznie dla prawie każdej zmiennej odnoszącej się do pamięci operacyjnej, poza powtarzaniem cyfr wspak. Oznacza to, że odnotowano różnice pomiędzy pomiarami przed stymulacją i po stymulacji na całej próbie badanej. w przypadku liczby poprawnych powtórzeń cyfr wprost, sumie punktów w zadaniu *Klocki Corsiego* (CBT), rozpiętości pamięci, całkowitej liczbie poprawnych prób w CBT oraz procencie poprawnie wykonanych ruchów w *Teście Sortowania Kart Berga* (BCST) wyższe wartości odnotowano w pomiarze drugim niż w pomiarze pierwszym. z kolei odwrotnie jest w przypadku stosunku ruchów wykonanych do minimalnej liczby ruchów w *Teście wieży londyńskiej* (TOL): po stymulacji wynik testu jest niższy niż przed stymulacją. Wszystkie opisane efekty są silne.

Dla czynnika międzyobiektywnego efekty istotne statystycznie odnotowano dla liczby poprawnych powtórzeń cyfr wprost i wspak oraz dla procenta poprawnie wykonanych ruchów w BCST. w dalszym kroku wykonano porównania *post hoc* z poprawką Bonferroniego. Okazało się, że w każdym omawianym przypadku grupa kontrolna pasywna cechowała się niższą wartością w średniej z obu pomiarów testów niż grupa eksperymentalna. Efekty te są o umiarkowanej sile.

Ponadto efekty interakcji pomiaru i grupy także okazały się istotne dla każdego zadania dotyczącego pamięci operacyjnej, poza liczbą poprawnych powtórzeń cyfr wspak. Dalej ponownie przeprowadzono testy *post hoc* z poprawką Bonferroniego, aby sprawdzić dokładne różnice pomiędzy grupami w obrębie pomiarów. Porównania pomiędzy grupami wykazały, że dla liczby poprawnych powtórzeń cyfr wprost, procenta poprawnych ruchów w BCST grupa eksperymentalna posiadała wyższe wyniki w testach niż grupa kontrolna pasywna i aktywna, lecz jedynie w drugim pomiarze oraz dla stosunku ruchów wykonanych do minimalnej liczby ruchów w TOL grupa eksperymentalna posiadała niższe wyniki w teście niż grupa kontrolna pasywna i aktywna, również tylko w drugim pomiarze. Nie odnotowano żadnych innych różnic pomiędzy grupami. Następnie sprawdzono różnice w obrębie grup pomiędzy pomiarami. Analiza wykazała, że w grupie eksperymentalnej i kontrolnej aktywnej doszło do wzrostu wyników zadań: powtarzanie cyfr wprost, oraz całkowitej liczbie poprawnych prób w CBT oraz rozpiętości pamięci. Jedynie w grupie eksperymentalnej doszło do wzrostu dla CBT – maksymalnej długości i sumy punktów oraz procenta poprawnych ruchów w BCST. Ponadto spadek stosunku ruchów wykonanych do minimalnej liczby ruchów w TOL zaobserwowano w każdej grupie. Dla powtarzania cyfr wprost CBT (poza sumą punktów) efekty są umiarkowane, a pozostałe efekty są silne.

Kolejno sprawdzono, czy stymulacja wpłynęła na proces pobudzania. Różnice te sprawdzono w zależności od grupy (tabele 20–22).

Tabela 20

Różnice w zakresie procesu pobudzania w zależności od warunku badawczego

Czynnik wewnątrzobiektywny	<i>F</i> (1,87)	<i>p</i>	η^2_p	Różnice
CTT-1	40,10	<0,001	0,32	P 1 > P 2
CTT-2	15,06	0,002	0,11	P 1 > P 2
GNG: poprawne reakcje	54,17	<0,001	0,38	P 1 < P 2
GNG: średni czas reakcji poprawnej 1	253,60	<0,001	0,75	P 1 > P 2
GNG: średni czas reakcji poprawnej 2	322,64	<0,001	0,79	P 1 > P 2
GNG: reakcje poprawne 1	11,64	0,001	0,12	P 1 < P 2
GNG: reakcje poprawne 2	10,47	0,002	0,11	P 1 < P 2
GNG: suma opuszczeń	19,98	<0,001	0,19	P 1 > P 2
GNG: liczba opuszczeń 1	9,80	0,002	0,10	P 1 > P 2
GNG: liczba opuszczeń 2	10,47	0,002	0,11	P 1 > P 2
TOL: czas do wykonania pierwszego ruchu	66,16	<0,001	0,43	P 1 > P 2

Czynnik międzyobiektywny	<i>F</i> (2,87)	<i>p</i>	η^2_p	Różnice: testy <i>post hoc</i>
CTT-1	7,81	0,001	0,15	G KP < G E, G KA
CTT-2	4,32	0,016	0,09	G KP < G E
GNG: poprawne reakcje	4,67	0,012	0,10	G E > G KA, G KP
GNG: średni czas reakcji poprawnej 1	0,34	0,710	0,01	-
GNG: średni czas reakcji poprawnej 2	0,14	0,869	<0,01	-
GNG: reakcje poprawne 1	0,60	0,550	0,01	-
GNG: reakcje poprawne 2	14,87	<0,001	0,26	G E > G KA, G KP
GNG: suma opuszczeń	3,17	0,047	0,07	G E < G KP
GNG: liczba opuszczeń 1	0,60	0,551	0,01	-
GNG: liczba opuszczeń 2	14,87	<0,001	0,26	G E < G KA G KP
TOL: czas do wykonania pierwszego ruchu	0,11	0,893	<0,01	-

Interakcja	<i>F</i> (2,87)	<i>p</i>	η^2_p	Testy <i>post hoc</i>	
				Różnice wewnątrz grup	Różnice pomiędzy grupami
CTT-1*Grupa	12,89	<0,001	0,23	G E, G KA: P 1 > P 2	P 1: G KP < G E, G KA P 2: G KP < G E, G KA
CTT-2*Grupa	15,06	<0,001	0,26	G E: P 1 > P 2	P 1: G KP < G E P 2: G E > G KA, G KP
GNG: poprawne reakcje*Grupa	30,28	<0,001	0,41	G E: P 1 < P 2	KP
GNG: średni czas reakcji poprawnej 1*Grupa	0,52	0,598	0,01	-	-
GNG: średni czas reakcji poprawnej 2*Grupa	0,11	0,898	<0,01	-	-
GNG: reakcje poprawne 1*Grupa	7,96	0,001	0,16	G E, G KP: P 1 < P 2	P 1: G KA > G KP
GNG: reakcje poprawne 2*Grupa	0,45	0,647	0,01	-	-
GNG: suma opuszczeń*Grupa	3,95	0,023	0,08	G E, G KP: P 1 > P 2	P 2: G E < G KA, G KP
GNG: liczba opuszczeń 1*Grupa	7,45	0,001	0,15	G E, G KP: P 1 > P 2	P 1: G KA < G KP
GNG: liczba opuszczeń 2*Grupa	0,45	0,637	0,01	-	-
TOL: czas do wykonania pierwszego ruchu*Grupa	0,87	0,422	0,02	-	-

Adnotacja. P – pomiar; G E – grupa eksperymentalna, G KA – grupa kontrolna aktywna, G KP – grupa kontrolna pasywna. w tabeli przedstawiono różnice istotne na poziomie $p < 0,05$, w przypadku testów *post hoc* porównania wykonano z poprawką Bonferroniego.

Tabela 21*Statystyki opisowe dla CTT i GNG w zależności od pomiaru i grupy*

Grupa	Pomiar	CTT-1		CTT-2		GNG: poprawne reakcje		GNG: średni czas reakcji poprawnej 1		GNG: średni czas reakcji poprawnej 2	
		M	SD*	M	SD*	M	SD*	M	SD*	M	SD*
G E	P 1	37,30	10,49	64,17	14,15	292,13	7,13	460,35	25,27	448,68	24,03
	P 2	30,97	6,48	58,87	11,10	300,53	5,95	419,81	29,74	414,26	29,80
	Ogółem	34,13	1,51	61,52	2,02	296,33	1,05	440,08	4,80	431,47	4,84
G KA	P 1	33,77	10,26	58,37	11,41	291,93	7,02	462,77	28,29	452,06	28,24
	P 2	31,63	9,71	58,47	11,16	292,87	5,72	428,03	24,30	418,12	24,38
	Ogółem	32,70	1,51	58,42	2,02	292,40	1,05	445,40	4,80	435,09	4,84
G KP	P 1	26,53	7,28	52,97	10,16	292,03	5,92	462,81	35,47	451,46	34,68
	P 2	25,93	5,90	53,47	9,05	292,80	4,76	425,89	26,77	415,43	25,83
	Ogółem	26,23	1,51	53,22	2,02	292,42	1,05	444,35	4,80	433,45	4,84
Ogółem	P 1	32,53	10,38	58,50	12,75	292,03	6,64	461,98	29,67	450,73	29,02
	P 2	29,51	7,89	56,93	10,66	295,40	6,55	424,58	26,95	415,94	26,52

Adnotacja. P – pomiar, G E – grupa eksperymentalna, G KA – grupa kontrolna aktywna, G KP – grupa kontrolna pasywna; * – dla statystyk dotyczących efektów czynnika międzyobiekowego w tabeli przedstawiono błąd standardowy (SE) zamiast odchylenia standardowego (SD).

Tabela 22*Statystyki opisowe dla zadań GNG i TOL w zależności od pomiaru i grupy*

Grupa	Pomiar	GNG: reakcje poprawne 1		GNG: reakcje poprawne 2		GNG: suma opuszczeń		GNG: liczba opuszczeń 1		GNG: liczba opuszczeń 2		TOL: czas do wykonania pierwszego ruchu	
		M	SD*	M	SD*	M	SD*	M	SD*	M	SD*	M	SD*
G E	P 1	127,60	0,62	126,63	0,85	2,37	2,17	0,40	0,62	1,37	0,85	10981,17	9736,56
	P 2	127,83	0,38	127,00	0,91	1,27	1,11	0,20	0,47	1,00	0,91	9051,17	7837,07
	Ogółem	127,72	0,08	126,82	0,14	1,82	0,22	0,30	0,08	1,18	0,14	10016,17	1464,59
G KA	P 1	127,83	0,38	125,93	1,01	2,27	1,28	0,17	0,38	2,07	1,01	10669,87	8166,61
	P 2	127,73	0,45	126,13	0,68	2,17	0,91	0,27	0,45	1,87	0,68	8396,80	5697,81
	Ogółem	127,78	0,08	126,03	0,14	2,22	0,22	0,22	0,08	1,97	0,14	9533,33	1464,59
G KP	P 1	127,47	0,63	125,53	1,07	3,00	1,39	0,53	0,63	2,47	1,07	11276,40	8947,93
	P 2	127,87	0,35	125,97	0,96	2,20	1,16	0,13	0,35	2,03	0,96	9759,91	7620,77
	Ogółem	127,67	0,08	125,75	0,14	2,60	0,22	0,33	0,08	2,25	0,14	10518,15	1464,59
Ogółem	P 1	127,63	0,57	126,03	1,08	2,54	1,68	0,37	0,57	1,97	1,08	10975,81	8875,38
	P 2	127,81	0,39	126,37	0,97	1,88	1,14	0,20	0,42	1,63	0,97	9069,29	7058,94

Analiza wykazała istotne statystycznie efekty czynnika wewnątrzobiekowego dla każdej zmiennej dotyczącej procesu pobudzania. w przypadku CTT-2 oraz GNG: Reakcji poprawnych reakcji w zadaniu No-Go w drugim podejściu mowa o efektach umiarkowanych,

lecz pozostałe są silne. Dla CTT-1 i CTT-2, średniego czasu reakcji poprawnej w obu podejściach oraz latencji pierwszego ruchu (TOL) wykazano wyższe wartości w pomiarze pierwszym niż drugim. Liczba opuszczeń w zadaniu GNG okazała się istotnie statystycznie – dla ogólnych opuszczeń jest to efekt silny, a dla pozostałych: efekty umiarkowane. Okazuje się zatem, że doszło do spadku liczby opuszczeń w drugim pomiarze. Dla pozostałych zmiennych odnotowano z kolei wzrost wartości po stymulacji.

Efekty czynnika międzyobiekтового są istotne statystycznie dla CTT-1, CTT-2 poprawnych reakcji i ogólnej liczby opuszczeń oraz liczby opuszczeń w drugiej części zadania (GNG). Odnotowane efekty są umiarkowane (CTT-2, GNG: Poprawne reakcje i liczba opuszczeń) oraz silne. Wykonano testy *post hoc* z poprawką Bonferroniego, by sprawdzić dokładne różnice pomiędzy grupami. Okazało się, że średnia obu pomiarów jest niższa w grupie kontrolnej pasywnej niż w grupie eksperymentalnej dla CTT-1 i CTT-2 oraz niższa niż w grupie kontrolnej aktywnej dla CTT-1. Wynik poprawnych reakcji był wyższy w grupie eksperymentalnej niż kontrolnych. w pierwszym efekcie porównania parami z poprawką Bonferroniego wskazują na mniejszą liczbę średniej z obu opuszczeń w grupie eksperymentalnej niż kontrolnej pasywnej. z kolei porównania dla drugiego efektu wykazały, że grupa eksperymentalna uzyskała mniej opuszczeń 2 R niż grupy kontrolne.

Podobne efekty uzyskano dla interakcji funkcji i grupy. Wynik istotnie statystycznie o dużej sile ponownie odnotowano dla CTT-1, CTT-2 oraz poprawnych reakcji i liczby opuszczeń 1 P w GNG (efekty silny). z kolei umiarkowany efekt uzyskano w ogólnej liczbie opuszczeń w GNG. Po wykonaniu testów *post hoc* z poprawką Bonferroniego wykazano, że dla CTT-1 w obu pomiarach niższe wartości odnotowano w grupie kontrolnej pasywnej niż pozostałych. w CTT-2 różnicę odnotowano jedynie pomiędzy grupą kontrolną pasywną a grupą eksperymentalną, z wyższym wynikiem dla drugiej wspomnianej grupy. Różnice w obrębie grup dla tych zmiennych są następujące: spadek pomiaru dla grupy eksperymentalnej i kontrolnej aktywnej w przypadku CTT-1, a dla CTT-2 spadek dotyczył jedynie grupy eksperymentalnej. Dla poprawnych reakcji różnice pomiędzy grupami odnotowano początkowo w pomiarze drugim. Wyższe wartości uzyskiwała grupa eksperymentalna niż kontrolne. Ponadto tylko grupa eksperymentalna doświadczyła wzrostu po stymulacji. Jednocześnie w drugiej części poprawnych reakcji grupa kontrolna aktywna uzyskiwała więcej punktów niż grupa kontrolna pasywna tylko w pierwszym pomiarze. Wzrost punktów po stymulacji uzyskano jedynie dla grupy eksperymentalnej i kontrolnej pasywnej. Dla ogólnych opuszczeń w pomiarze drugim opuszczenia te występowały rzadziej u osób z grupy

eksperymentalnej niż kontrolnych. Dla opuszczeń 1 P więcej opuszczeń odnotowano w grupie kontrolnej aktywnej niż pasywnej. Jednocześnie w grupach eksperymentalnej i kontrolnej pasywnej zaobserwowano spadek opuszczeń pomiędzy pomiarami.

Jako następne przetestowano różnice pomiędzy grupami w zakresie zmian dotyczących pomiarów przed manipulacją i po manipulacji (tabele 23–24).

Tabela 23

Różnice w zakresie procesu hamowania w zależności od warunku badawczego

Czynnik wewnątrzobiektywny	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2_p	Różnice	
	(1, 87)				
GNG: błędne reakcje	55,10	< 0,001	0,39	P 1 > P 2	
GNG: średni czas reakcji błędnej 1	221,19	< 0,001	0,72	P 1 > P 2	
GNG: średni czas reakcji błędnej 2	221,89	< 0,001	0,72	P 1 > P 2	
GNG: błędne reakcje: No Go 1	46,26	< 0,001	0,35	P 1 > P 2	
GNG: błędne reakcje: No Go 2	3,31	0,072	0,04	-	
Czynnik międzyobiektywny	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2_p	Różnice: testy <i>post hoc</i>	
	(2, 87)				
GNG: błędne reakcje	5,27	0,007	0,11	G E < G KA, G KP	
GNG: średni czas reakcji błędnej 1	0,09	0,918	<0,01	-	
GNG: średni czas reakcji błędnej 2	0,30	0,743	0,01	-	
GNG: błędne reakcje: No Go 1	3,44	0,036	0,07	-	
GNG: błędne reakcje: No Go 2	3,83	0,026	0,08	G E < G KP	
Interakcja	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2_p	Testy <i>post hoc</i>	
	(2, 87)			Różnice wewnątrz grup	Różnice pomiędzy grupami
GNG: błędne reakcje*Grupa	30,24	< 0,001	0,41	G E: P 1 > P 2	P 2: G E < G KA, G KP
GNG: średni czas reakcji błędnej 1	0,71	0,495	0,02	-	-
*Grupa					
GNG: średni czas reakcji błędnej 2	1,79	0,174	0,04	-	-
*Grupa					
GNG: błędne reakcje: No Go 1*Grupa	21,06	< 0,001	0,33	G E: P 1 > P 2	P 2: G E < G KA, G KP
GNG: błędne reakcje: No Go 2*Grupa	5,28	0,007	0,11	G E: P 1 > P 2	P 2: G E < G KA, G KP

Adnotacja. P – pomiar; G E – grupa eksperymentalna, G KA – grupa kontrolna aktywna, G KP – grupa kontrolna pasywna. w tabeli przedstawiono różnice istotne na poziomie $p < 0,05$, w przypadku testów *post hoc* porównania wykonano z poprawką Bonferroniego.

Tabela 24

Statystyki opisowe dla zadań GNG dotyczących błędnych reakcji w zależności od pomiaru i grupy

Grupa	Pomiar	GNG: błędne reakcje		GNG: średni czas reakcji błędnej 1		GNG: średni czas reakcji błędnej 2		GNG: błędne reakcje: No Go 1		GNG: błędne reakcje: No Go 2	
		<i>M</i>	<i>SD*</i>	<i>M</i>	<i>SD*</i>	<i>M</i>	<i>SD*</i>	<i>M</i>	<i>SD*</i>	<i>M</i>	<i>SD*</i>
G E	P 1	27,60	6,21	422,33	27,76	388,17	31,51	9,70	2,58	15,00	4,39
	P 2	19,47	5,95	393,96	26,41	365,46	35,61	5,57	2,75	12,77	2,79
	Ogółem	23,53	1,02	408,15	4,72	376,82	4,93	7,63	0,53	13,88	0,72
G KA	P 1	28,07	7,02	422,20	26,59	387,35	26,09	9,77	2,86	15,90	3,99
	P 2	27,13	5,72	396,93	24,19	358,27	22,72	8,93	2,66	16,07	3,76
	Ogółem	27,60	1,02	409,56	4,72	372,81	4,93	9,35	0,53	15,98	0,72
G KP	P 1	27,97	5,92	422,19	32,57	387,12	29,51	9,47	3,95	16,47	5,93
	P 2	27,20	4,76	391,41	25,86	356,26	22,52	9,13	3,73	16,63	4,11
	Ogółem	27,58	1,02	406,80	4,72	371,69	4,93	9,30	0,53	16,55	0,72
Ogółem	P 1	27,88	6,33	422,24	28,76	387,55	28,80	9,64	3,15	15,79	4,83
	P 2	24,60	6,55	394,10	25,32	360,00	27,61	7,88	3,47	15,16	3,95

Adnotacja. P – pomiar, G E – grupa eksperymentalna, G KA – grupa kontrolna aktywna, G KP – grupa kontrolna pasywna; * – dla statystyk dotyczących efektów czynnika międzyobiektowego w tabeli przedstawiono błąd standardowy (SE) zamiast odchylenia standardowego (SD).

Wśród procesu hamowania efekty czynnika wewnątrzobiektowego okazały się istotne statystycznie dla prawie każdego aspektu zadania GNG – z wyjątkiem błędnych reakcji w drugiej części zadania. w każdym przypadku mowa o spadku błędnych reakcji i średniego czasu błędnych reakcji po stymulacji. Efekty te są silne.

Z kolei dla czynnika międzyobiektowego efekty istotne odnotowano dla liczby błędnych reakcji (efekty umiarkowane). Dla pierwszej części zadania błędne reakcje – mimo efekty istotnego statystycznie – w testach *post hoc* z poprawką Bonferroniego nie wykazały różnic istotnych statystycznie. Różnice zaobserwowano w ogólnych błędnych reakcja: grupa eksperymentalna uzyskała mniej błędnych reakcji ogólnie ze średniej obu pomiarów niż grupy kontrolne. Natomiast w drugiej części zadania błędne reakcje występowały rzadziej jako średnia obu pomiarów wśród grupy eksperymentalnej niż grupy kontrolnej pasywnej. Nie odnotowano innych istotnych różnic.

Efekty interakcji funkcji i grupy okazały się istotne statystycznie dla błędnych reakcji – ogólnych oraz w obu częściach zadania. Efekty te są głównie silne – poza efektem dla błędnych reakcji w drugiej części zadania (efekt umiarkowany). Dalej wykonane testy *post hoc* z poprawką Bonferroniego wskazują na niższe wyniki zadania w grupie eksperymentalnej niż

w grupach kontrolnych. Ponadto wyłącznie w grupie eksperymentalnej doszło do spadku błędnych reakcji po stymulacji.

Jako ostatnie w tej części przetestowano różnice w procesie kontroli działania w zależności od trzech badanych grup. w tabelach 25–27 zostały przedstawione wyniki analiz.

Tabela 25

Różnice w zakresie procesu kontroli działania w zależności od warunku badawczego

Czynnik wewnątrzobiektywy	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2_p	Różnice	
	(1,87)				
CTT: wskaźnik zakłóceń	18,37	<0,001	0,17	P 1 > P 2	
BCST: błędy perseweracyjne	1,60	0,210	0,02	-	
BCST: błędy nieperseweracyjne	7,40	0,008	0,08	P 1 > P 2	
BCST: reakcje zgodne z koncepcją logiczną	90,74	<0,001	0,51	P1 < P 2	
TOL: całkowity czas wykonania	22,39	<0,001	0,21	P 1 > P 2	
TOL: różnica ruchów wykonanych i minimalnej liczby ruchów	67,84	<0,001	0,44	P 1 > P 2	
Czynnik międzyobiektywy	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2_p	Różnice: testy <i>post hoc</i>	
	(2,87)				
CTT: wskaźnik zakłóceń	3,21	0,045	0,07	-	
BCST: błędy perseweracyjne	10,91	<0,001	0,20	G E < G KA, G KP	
BCST: błędy nieperseweracyjne	0,53	0,590	0,01	-	
BCST: reakcje zgodne z koncepcją logiczną	11,96	<0,001	0,22	G E > G KA, G KP	
TOL: całkowity czas wykonania	0,72	0,490	0,02	-	
TOL: różnica ruchów wykonanych i minimalnej liczby ruchów	2,08	0,131	0,05	-	
Interakcja	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2_p	Testy <i>post hoc</i>	
				Różnice wewnątrz grup	Różnice pomiędzy grupami
	(2,87)				
CTT: wskaźnik zakłóceń*Grupa	2,12	0,126	0,05	-	-
BCST: błędy perseweracyjne*Grupa	9,66	<0,001	0,18	G E: P 1 > P 2; G KP: P 1 < P 2	P 2: G E < G KA, G KP
BCST: błędy nieperseweracyjne*Grupa	3,89	0,024	0,08	G E: P 1 > P 2	-
BCST: reakcje zgodne z koncepcją logiczną	70,80	<0,001	0,62	G E: P 1 < P 2	P 2: G E > G KA, G KP
TOL: całkowity czas wykonania*Grupa	14,19	<0,001	0,25	G E: P 1 > P 2	-
TOL: różnica ruchów wykonanych i minimalnej liczby ruchów*Grupa	26,23	<0,001	0,38	G E, G KP: P 1 > P 2	P 2: G E < G KA, G KP

Adnotacja. P – pomiar; G E – grupa eksperymentalna, G KA – grupa kontrolna aktywna, G KP – grupa kontrolna pasywna. w tabeli przedstawiono różnice istotne na poziomie $p < 0,05$, w przypadku testów *post hoc* porównania wykonano z poprawką Bonferroni.

Tabela 26*Statystyki opisowe dla CTT i BCST w zależności od pomiaru i grupy*

Grupa	Pomiar	CTT wskaźnik zakłóceń		BCST: błędy perseweracyjne		BCST: błędy nieperseweracyjne		BCST: reakcje zgodne z koncepcją logiczną	
		<i>M</i>	<i>SD*</i>	<i>M</i>	<i>SD*</i>	<i>M</i>	<i>SD*</i>	<i>M</i>	<i>SD*</i>
G E	P 1	0,77	0,32	10,36	1,39	6,15	3,06	75,33	3,42
	P 2	0,91	0,27	8,82	1,34	4,06	2,16	84,14	4,16
	Ogółem	0,84	0,08	9,59	0,26	5,11	0,33	79,74	0,59
G KA	P 1	0,81	0,45	11,29	1,81	4,82	2,82	75,93	3,53
	P 2	0,95	0,48	11,26	2,09	4,89	2,04	76,41	3,01
	Ogółem	0,88	0,08	11,28	0,26	4,86	0,33	76,17	0,59
G KP	P 1	1,08	0,54	10,36	1,91	5,65	2,18	76,08	4,19
	P 2	1,11	0,48	11,11	1,88	5,03	1,77	76,34	3,20
	Ogółem	1,10	0,08	10,74	0,26	5,34	0,33	76,21	0,59
Ogółem	P 1	0,89	0,46	10,67	1,75	5,54	2,74	75,78	3,70
	P 2	0,99	0,43	10,40	2,10	4,66	2,02	78,96	5,05

Adnotacja. P – pomiar, G E – grupa eksperymentalna, G KA – grupa kontrolna aktywna, G KP – grupa kontrolna pasywna; * – dla statystyk dotyczących efektów czynnika międzyobiektywnego w tabeli przedstawiono błąd standardowy (SE) zamiast odchylenia standardowego (SD).

Tabela 27*Statystyki opisowe dla zadań TOL w zależności od pomiaru i grupy*

Grupa	Pomiar	TOL: całkowity czas wykonania		TOL: różnica ruchów wykonanych i minimalnej liczby ruchów	
		<i>M</i>	<i>SD*</i>	<i>M</i>	<i>SD*</i>
G E	P 1	185,11	76,68	10,67	5,73
	P 2	146,20	45,14	4,70	3,16
	Ogółem	165,65	11,52	7,68	0,81
G KA	P 1	182,02	60,30	10,03	5,39
	P 2	179,72	63,48	10,00	5,11
	Ogółem	180,87	11,52	10,02	0,81
G KP	P 1	185,79	73,58	10,10	4,95
	P 2	181,95	65,20	7,77	3,27
	Ogółem	183,87	11,52	8,93	0,81
Ogółem	P 1	184,31	69,77	10,27	5,31
	P 2	169,29	60,27	7,49	4,47

Adnotacja. P – pomiar, G E – grupa eksperymentalna, G KA – grupa kontrolna aktywna, G KP – grupa kontrolna pasywna; * – dla statystyk dotyczących efektów czynnika międzyobiektywnego w tabeli przedstawiono błąd standardowy (SE) zamiast odchylenia standardowego (SD).

Analiza wykazała, że efekty istotne statystycznie dla każdego aspektu procesu kontroli działania są istotne statystycznie – z wyjątkiem procenta błędów perseweracyjnych w BCST.

Poza procentem błędów nieperseweracyjnych (efekt umiarkowany) zaobserwowano jedynie efekty silne. Dla procenta odpowiedzi na poziomie koncepcyjnym odnotowano wzrost w grupie w drugim pomiarze. Dla reszty zmiennych uzyskano spadek wartości pomiędzy pomiarami.

Efekty czynnika międzyobiekowego okazały się istotne dla wskaźnika zakłóceń CTT (efekt umiarkowany), procenta odpowiedzi perseweracyjnych oraz na poziomie koncepcyjnym (efekt silny). Dla wskaźnika zakłóceń porównania okazały się nieistotne statystycznie. Dla procenta błędów perseweracyjnych wyniki ze średniej obu pomiarów okazały się niższe niż grup kontrolnych. z kolei dla procenta odpowiedzi na poziomie koncepcyjnym średnia wartość była wyższa w grupie eksperymentalnej niż pozostałych kontrolnych.

Efekty interakcji czynników okazały się istotne dla prawie każdej zmiennej, z wyjątkiem CTT: wskaźnika zakłóceń. Jedynie interakcja procenta błędów nieperseweracyjnych w BCST i warunku badawczego jest efektem o umiarkowanej sile – pozostałe z kolei są silne. w porównaniach parami z poprawką Bonferroniego wykazano, że w drugim pomiarze grupa eksperymentalna uzyskiwała większy procent odpowiedzi na poziomie koncepcyjnym niż grupy kontrolne. Jednocześnie cechowała się ona niższym procentem błędów perseweracyjnych w BCST i mniejszą różnicą ruchów wykonanych z najmniejszą liczbą ruchów (TOL) niż grupy kontrolne. w obrębie grup doszło także do istotnych zmian. w grupie eksperymentalnej doszło do spadku procenta błędów perseweracyjnych, zaś w grupie kontrolnej pasywnej – do wzrostu. Ponadto wśród grupy eksperymentalnej odnotowano spadek pomiędzy pomiarami dla procenta błędów nieperseweracyjnych, odpowiedzi na poziomie koncepcyjnych oraz całkowitego czasu wykonania próby (TOL). Jednocześnie zarówno w grupie eksperymentalnej, jak i w grupie kontrolnej pasywnej zaobserwowano spadek dla różnicy ruchów wykonanych a najmniejszą liczbą ruchów (TOL).

3.3.Związek pomiędzy wyjściowym poziomem funkcji wykonawczych a wielkością zmiany w zakresie tych funkcji po przebytej stymulacji tDCS

W następnym kroku analiz statystycznych przetestowano, czy wyjściowy poziom badanych funkcji wykonawczych koreluje z wielkością zmian w tych funkcjach. Wykonano w tym celu serię analiz korelacji *rho* Spearmana. Analizy korelacji zostały wykonane przy

podziale na grupy warunków badawczych. Założono, że im niższy wynik w danym procesie w pre-teście, tym większa spodziewana poprawa po przebytej stymulacji tDCS występuje w post-teście. w celu odpowiedzi na to pytanie zastosowano analizę korelacji *rho* Spearmana, w której porównano wyniki wyjściowe uzyskane w pre-teście z wynikami różnicy uzyskanej między pre-testem a post-testem dla poszczególnych wskaźników funkcji wykonawczych w czterech składowych, czyli: pamięci operacyjnej, pobudzania, hamowania oraz kontroli działania. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 28.

Tabela 28

Analiza związku między wyjściowym poziomem funkcjonowania poznawczego a uzyskaną poprawą po stymulacji tDCS, stymulacji sham i grupą kontrolną

Zmienna		Grupa eksperymentalna	Grupa kontrolna aktywna	Grupa kontrolna pasywna
Pamięć operacyjna				
Powtarzanie cyfr wprost	<i>rho</i> Spearmana	-0,544	-0,558	-0,315
	istotność	0,002	0,001	0,090
Powtarzanie cyfr wspak	<i>rho</i> Spearmana	-0,542	-0,373	-0,412
	istotność	0,002	0,043	0,024
CBT: max. długość	<i>rho</i> Spearmana	-0,432	-0,707	-0,324
	istotność	0,017	<0,001	0,080
CBT: suma punktów	<i>rho</i> Spearmana	-0,437	-0,550	-0,217
	istotność	0,016	0,002	0,249
CBT: poprawne próby	<i>rho</i> Spearmana	-0,628	-0,573	-0,303
	istotność	<0,001	0,001	0,104
CBT: rozpiętość pamięci	<i>rho</i> Spearmana	-0,652	-0,573	-0,303
	istotność	<0,001	0,001	0,104
BCST: poprawne ruchy	<i>rho</i> Spearmana	-0,704	-0,638	0,057
	istotność	<0,001	0,001	0,756
TOL: stosunek ruchy wykonane /minimalna liczba ruchów	<i>rho</i> Spearmana	0,748	0,374	0,736
	istotność	<0,001	0,041	<0,001
Proces pobudzenia				
CTT-1: czas WS	<i>rho</i> Spearmana	0,639	0,313	0,550
	istotność	<0,001	0,093	0,002
CTT-2: czas WS	<i>rho</i> Spearmana	0,609	0,231	0,590
	istotność	<0,001	0,220	0,001
GNG: poprawne reakcje	<i>rho</i> Spearmana	-0,780	-0,730	-0,627
	istotność	<0,001	<0,001	<0,001
GNG: reakcje poprawne 1	<i>rho</i> Spearmana	-0,611	-0,442	-0,758
	istotność	<0,001	0,014	<0,001
GNG: reakcje poprawne 2	<i>rho</i> Spearmana	-0,757	-0,748	-0,496
	istotność	<0,001	<0,001	0,005
GNG: średni czas reakcji poprawnej 1	<i>rho</i> Spearmana	0,622	0,498	0,811
	istotność	<0,001	0,005	<0,001
GNG: średni czas reakcji poprawnej 2	<i>rho</i> Spearmana	0,248	0,521	0,834
	istotność	0,185	0,003	<0,001
GNG: suma opuszczeń	<i>rho</i> Spearmana	-0,842	-0,713	-0,597
	istotność	<0,001	<0,001	<0,001
GNG: liczba opuszczeń 1	<i>rho</i> Spearmana	-0,611	-0,442	-0,758
	istotność	<0,001	0,014	<0,001
GNG: liczba opuszczeń 2	<i>rho</i> Spearmana	-0,757	-0,748	-0,496
	istotność	<0,001	<0,001	0,005
TOL: czas do wykonania pierwszego ruchu	<i>rho</i> Spearmana	0,760	0,997	0,815
	istotność	<0,001	<0,001	<0,001

Zmienna		Grupa eksperymentalna	Grupa kontrolna aktywna	Grupa kontrolna pasywna
Proces hamowania (GNG)				
GNG: błędne reakcje	<i>rho</i> Spearmana	-0,791	0,730	0,627
	istotność	<0,001	<0,001	<0,001
GNG: błędne reakcje: No Go 1	<i>rho</i> Spearmana	-0,769	-0,473	-0,228
	istotność	<0,001	0,008	0,225
GNG: błędne reakcje: No Go 2	<i>rho</i> Spearmana	-0,727	-0,555	-0,636
	istotność	<0,001	0,001	<0,001
GNG: średni czas reakcji błędnej 1	<i>rho</i> Spearmana	0,423	0,520	0,697
	istotność	0,020	0,003	<0,001
GNG: średni czas reakcji błędnej 2	<i>rho</i> Spearmana	-0,036	0,528	0,799
	istotność	0,849	0,003	<0,001
Proces kontroli działania				
CTT wskaźnik zakłóceń	<i>rho</i> Spearmana	0,457	0,233	0,452
	istotność	0,011	0,216	0,012
BCST: błędy perseweracyjne	<i>rho</i> Spearmana	0,736	0,451	0,712
	istotność	<0,001	0,012	<0,001
BCST: błędy nieperseweracyjne	<i>rho</i> Spearmana	0,663	0,725	0,634
	istotność	<0,001	<0,001	<0,001
BCST: odpowiedzi na poziomie koncepcyjnym	<i>rho</i> Spearmana	-0,310	-0,537	-0,610
	istotność	0,095	0,002	<0,001
TOL: całkowity czas wykonania	<i>rho</i> Spearmana	0,863	0,748	0,753
	istotność	<0,001	<0,001	<0,001
TOL: różnica pomiędzy ruchami wykonanymi a najmniejszą liczbą ruchów	<i>rho</i> Spearmana	0,723	0,403	0,786
	istotność	<0,001	0,024	<0,001

Analiza uzyskanych wyników wskazała na istnienie zależności, zgodnie z którą niższy początkowy wynik był skorelowany z większą poprawą podczas drugiego pomiaru, co miało miejsce w większości zbadanych zmiennych. Związek między wyjściowym poziomem funkcji wykonawczych a wielkością zmiany, wyrażonej różnicą wyniku uzyskanego w pre-teście i wyniku uzyskanego w post-teście ujawnił się zarówno w grupie eksperymentalnej, jak i w grupach kontrolnych. Istotny związek w zakresie pamięci operacyjnej w grupie eksperymentalnej dotyczy (w kolejności od największego do najmniejszego związku): stosunku ruchów wykonanych do minimalnej liczby ruchów w TOL (korelacja bardzo silna), poprawnych ruchów w BCST, rozpiętości pamięci i poprawnych prób w CBT, liczby poprawnych powtórzeń cyfr wprost i wstak (korelacje silne), sumie punktów i maksymalnej długości w CBT (korelacja umiarkowana).

W procesie pobudzania w grupie eksperymentalnej istotne związki dotyczą (w kolejności od największego do najmniejszego związku): sumy opuszczeń i sumy poprawnych

reakcji w GNG, czasu do wykonania pierwszego ruchu w TOL, poprawnych reakcji w drugiej części zadania GNG, opuszczeń w drugiej części zadania GNG (korelacje bardzo silne), czasu wykonania CTT-1, średniego czasu poprawnej reakcji w pierwszej części zadania GNG, opuszczeni w pierwszej części zadania GNG, czasu wykonania CTT-2 (korelacje silne). Związku między poziomem początkowym a uzyskaną różnicą w drugim pomiarze nie odnotowano jedynie w średnim czasie poprawnej reakcji w drugiej części zadania GNG

W procesie hamowania w grupie eksperymentalnej istotne związki dotyczą (w kolejności od największego do najmniejszego związku): sumy błędnych reakcji, błędnych reakcji w pierwszej oraz drugiej części zadania GNG (bardzo silne korelacje), średnim czasie reakcji błędnej w pierwszej części zadania GNG (korelacja umiarkowana).

W procesie kontroli działania w grupie eksperymentalnej istotne związki dotyczą (w kolejności od największego do najmniejszego związku): całkowitego czasu wykonania TOL, błędów perseweracyjnych w BCST, różnicy pomiędzy ruchami wykonanymi a najmniejszą liczbą ruchów w TOL (bardzo silne korelacje), błędów nieperseweracyjnych w BCST (korelacja silna) oraz we wskaźniku zakłóceń w CTT (korelacja umiarkowana). Nie odnotowano związku między początkowym pomiarem a wielkością poprawy w odpowiedziach na poziomie koncepcyjnym w BCST.

Podobne zależności wystąpiły również w grupach kontrolnych, choć były one nieco słabsze w porównaniu z grupą eksperymentalną. Ta różnica może być częściowo wyjaśniona przez obecność tzw. efektu sufitowego, czyli fakt, że badane osoby były już początkowo na stosunkowo wysokim poziomie funkcjonowania, co ograniczało możliwość obserwacji dużej poprawy.

Efekt sufitowy oznacza, że początkowo wysokie wyniki badanych osób, które były zdrowymi młodymi dorosłymi, mogły ograniczać możliwość zaobserwowania większych poprawek. w praktyce oznacza to, że badani mieli już wysoki poziom funkcjonowania poznawczego na początku badania, a więc ich możliwości poprawy były ograniczone. Nawet przy stymulacji sham, która nie powinna wpływać na wyniki, obserwowano pewne zmiany, jednak nie tak znaczące jak przy aktywnej stymulacji. To sugeruje, że w pewnym stopniu wyniki były związane z naturalnymi fluktuacjami wyników badanych osób.

Innym możliwym wyjaśnieniem jest tzw. efekt testowania. Powtórne wykonywanie tych samych zadań i testów podczas drugiego pomiaru może prowadzić do poprawy wyników.

Badani stają się bardziej zaznajomieni z zadaniami, zwiększają swoje umiejętności rozwiązywania problemów, lepiej radzą sobie z wymaganiami testu itp. To może prowadzić do zwiększenia wyników w drugim pomiarze, szczególnie u osób, które miały początkowo niższy poziom funkcjonowania poznawczego.

Podsumowując, analiza danych wskazuje na istnienie zależności między początkowym poziomem funkcjonowania poznawczego a uzyskaną poprawą. Niższe początkowe wyniki predysponują do większej poprawy, a ten efekt był obserwowany zarówno przy aktywnej stymulacji tDCS, jak i w grupach kontrolnych. Można stwierdzić, że istnieje zależność między początkowym poziomem funkcji wykonawczych a wielkością poprawy podczas drugiego pomiaru. Wyniki te wskazują na istotną rolę początkowego poziomu funkcjonowania w predyktowaniu poprawy funkcji wykonawczych. Niższe początkowe wyniki sugerują większy potencjał do poprawy, co jest istotne zarówno przy aktywnej stymulacji, jak i w grupie placebo oraz grupie bez oddziaływań. Obecność tej zależności w grupie eksperymentalnej i grupach kontrolnych wskazuje na jej ogólny charakter, niezależny od zastosowanej metody. Wnioski te sugerują, że początkowy poziom funkcjonowania poznawczego ma istotne znaczenie w przewidywaniu poprawy funkcji wykonawczych.

3.4. Związek pomiędzy wielkością zmiany w pamięci operacyjnej a wielkością zmian w innych procesach funkcji wykonawczych po przebytej stymulacji tDCS

W następnym kroku analiz statystycznych przetestowano, czy wielkość zmian w badaniu pamięci operacyjnej koreluje z wielkością zmian w pozostałych procesach funkcji wykonawczych, czyli procesach pobudzania, hamowania oraz kontroli działania. Wykonano w tym celu serię analiz korelacji *rho* Spearmana. Analizy korelacji zostały wykonane przy podziale na grupy warunków badawczych. Początkowo sprawdzono, czy te związki występują dla zmian w procesach pobudzania w grupie eksperymentalnej (tabela 29).

Tabela 29

Korelacje zmian w pamięci operacyjnej a zmian w procesie pobudzania w grupie eksperymentalnej

Grupa eksperymentalna		Zmiany w pamięci operacyjnej							
		PCW1	PCW2	CBT1	CBT2	CBT3	CBT4	BCST	TOL
Zmiany w procesie pobudzania									
CTT-1: czas WS	<i>rho</i> Spearmana	-0,16	-0,28	-0,05	-0,19	-0,29	-0,22	0,25	-0,19
	istotność	0,399	0,140	0,781	0,314	0,122	0,253	0,180	0,318
CTT-2 : czas WS	<i>rho</i> Spearmana	-0,23	0,13	-0,23	-0,22	-0,18	-0,12	0,00	-0,23
	istotność	0,218	0,486	0,229	0,249	0,328	0,534	0,979	0,217
TOL: czas do wykonania pierwszego ruchu	<i>rho</i> Spearmana	0,07	-0,17	-0,02	-0,04	-0,08	-0,12	0,34	-0,33
	istotność	0,706	0,359	0,904	0,844	0,689	0,520	0,067	0,076
GNG: poprawne reakcje	<i>rho</i> Spearmana	0,00	-0,36	-0,24	-0,27	-0,30	-0,33	-0,40	0,09
	istotność	0,978	0,049	0,195	0,142	0,112	0,079	0,028	0,619
GNG: średni czas reakcji poprawnej 1	<i>rho</i> Spearmana	0,04	0,15	0,07	-0,09	-0,09	-0,16	0,03	-0,15
	istotność	0,847	0,442	0,732	0,655	0,620	0,397	0,884	0,429
GNG: średni czas reakcji poprawnej 2	<i>rho</i> Spearmana	0,06	-0,09	0,22	0,12	0,07	-0,01	0,11	0,21
	istotność	0,745	0,649	0,242	0,513	0,706	0,938	0,578	0,256
GNG: reakcje poprawne 1	<i>rho</i> Spearmana	0,23	0,30	0,14	0,03	0,00	-0,11	0,25	-0,38
	istotność	0,228	0,106	0,450	0,894	0,979	0,551	0,183	0,037
GNG: reakcje poprawne 2	<i>rho</i> Spearmana	0,03	-0,16	-0,30	-0,48	-0,49	-0,53	-0,04	0,00
	istotność	0,892	0,400	0,103	0,008	0,005	0,003	0,838	0,963
GNG: suma opuszczeń	<i>rho</i> Spearmana	-0,14	-0,18	-0,08	0,16	0,23	0,31	-0,37	0,17
	istotność	0,462	0,330	0,689	0,389	0,231	0,098	0,044	0,362
GNG: liczba opuszczeń 1	<i>rho</i> Spearmana	-0,23	-0,30	-0,14	-0,03	0,00	0,11	-0,25	0,38
	istotność	0,228	0,106	0,450	0,894	0,979	0,551	0,183	0,037
GNG: liczba opuszczeń 2	<i>rho</i> Spearmana	-0,03	0,16	0,30	0,48	0,49	0,53	0,04	0,00
	istotność	0,892	0,400	0,103	0,008	0,005	0,003	0,838	0,963

Adnotacja. PCW1 – Powtarzanie cyfr wprost, PCW2 – powtarzanie cyfr wspak, CBT1 – max. długość, CBT2 – suma punktów, CBT3 – liczba poprawnych prób, CBT4 – rozpiętość pamięci, BCST – procent poprawnych ruchów w BCST, TOL – stosunek ruchów wykonanych do minimalnej liczby ruchów w TOL.

W grupie eksperymentalnej różnice w obrębie pamięci operacyjnej są powiązane w nieznacznym sposób ze zmianami w zakresie procesu pobudzania. Zmiana dla ogólnych poprawnych reakcji jest powiązana ujemnie ze zmianą w zakresie powtarzania cyfr wspak i procencie poprawnych ruchów w BCST. Zmiana w reakcji poprawnych w GNG w pierwszej części zadania jest powiązana ujemnie ze zmianą stosunku ruchów wykonanych a minimalnej liczbie ruchów. Ujemne reakcje zaobserwowano także pomiędzy zmianą poprawnych reakcji w GNG w drugiej części zadania a zmianami w zadaniu CBT: sumą punktów, liczbą poprawnych prób i rozpiętością pamięci. Zmiana w opuszczeniach ogólnych

jest powiązana ze zmianą dotyczącą procenta poprawnych ruchów w BCST (korelacja ujemna). Prawie każda z tych korelacji jest o umiarkowanej sile – wyjątek stanowi relacja między zmianą w poprawnych reakcjach w GNG w drugiej części zadania a zmianami w rozpiętości pamięci (związek silny). Ujemny znak związków świadczy o tym, że wraz ze wzrostem zmian w funkcjach pamięci operacyjnej maleje natężenie zmian procesu pobudzania.

Jednocześnie zmiana w opuszczeniach 1 P jest powiązania dodatnio ze zmianą w TOL (stosunek ruchów wykonanych a minimalnej liczby ruchów). Związek ten jest umiarkowany. Dodatkowo różnica w opuszczeniach 2 R jest skorelowana z różnicami w zadaniach CBT: suma punktów, liczba poprawnych prób (korelacje umiarkowane) i rozpiętości pamięci (korelacja silna). Wynika z tego, że im większa zmiana nastąpiła w opuszczeniach 1 P i 2 R, tym większe zmiany zaszły we wcześniej opisanych procesach pamięci operacyjnej.

Analogiczne analizy wykonano dla grupy kontrolnej aktywnej (tabela 30). Wyniki analiz korelacji nie wykazały żadnego istotnego statystycznie związku. Oznacza to, że w grupie kontrolnej aktywnej zmiany, które zaszły w procesie pobudzania pomiędzy pomiarami nie są powiązane ze zmianami w pamięci operacyjnej.

Tabela 30

Korelacje zmian w pamięci operacyjnej a zmian w procesie pobudzania w grupie kontrolnej aktywnej

Zmiany w procesie pobudzania		Zmiany w pamięci operacyjnej							
		PCW1	PCW2	CBT1	CBT2	CBT3	CBT4	BCST	TOL
CTT-1: czas WS	<i>rho</i> Spearmana	0,19	0,12	0,00	-0,05	-0,11	-0,11	-0,13	0,07
	istotność	0,312	0,540	0,969	0,774	0,576	0,576	0,506	0,722
CTT-2: czas WS	<i>rho</i> Spearmana	0,03	0,10	0,21	0,14	0,13	0,13	0,15	-0,16
	istotność	0,858	0,591	0,266	0,468	0,480	0,480	0,427	0,387
TOL: czas do wykonania pierwszego ruchu	<i>rho</i> Spearmana	-0,09	-0,17	0,01	-0,22	-0,30	-0,30	-0,14	-0,25
	istotność	0,623	0,366	0,947	0,252	0,106	0,106	0,445	0,177
GNG: poprawne reakcje	<i>rho</i> Spearmana	0,07	0,22	0,04	0,08	0,08	0,08	-0,05	0,14
	istotność	0,694	0,236	0,830	0,674	0,669	0,669	0,785	0,450
GNG: średni czas reakcji poprawnej 1	<i>rho</i> Spearmana	-0,02	0,20	0,20	0,07	0,02	0,02	-0,07	0,19
	istotność	0,911	0,299	0,294	0,711	0,902	0,902	0,713	0,315
GNG: średni czas reakcji poprawnej 2	<i>rho</i> Spearmana	-0,04	0,18	0,20	0,08	0,04	0,04	-0,07	0,18
	istotność	0,831	0,341	0,294	0,661	0,836	0,836	0,701	0,338
GNG: reakcje poprawne 1	<i>rho</i> Spearmana	0,02	-0,01	0,07	0,11	0,12	0,12	0,21	0,12
	istotność	0,917	0,947	0,723	0,551	0,513	0,513	0,275	0,511
GNG: reakcje poprawne 2	<i>rho</i> Spearmana	-0,14	-0,22	-0,03	0,06	0,12	0,12	-0,05	0,19
	istotność	0,448	0,245	0,873	0,733	0,514	0,514	0,803	0,307
GNG: suma opuszczeń	<i>rho</i> Spearmana	0,16	0,15	-0,03	-0,11	-0,17	-0,17	0,00	-0,17
	istotność	0,407	0,420	0,885	0,549	0,383	0,383	0,982	0,357
GNG: liczba opuszczeń 1	<i>rho</i> Spearmana	-0,02	0,01	-0,07	-0,11	-0,12	-0,12	-0,21	-0,12
	istotność	0,917	0,947	0,723	0,551	0,513	0,513	0,275	0,511
GNG: liczba opuszczeń 2	<i>rho</i> Spearmana	0,14	0,22	0,03	-0,06	-0,12	-0,12	0,05	-0,19
	istotność	0,448	0,245	0,873	0,733	0,514	0,514	0,803	0,307

Adnotacja. PCW1 – Powtarzanie cyfr wprost, PCW2 – powtarzanie cyfr wspak, CBT1 – max. długość, CBT2 – suma punktów, CBT3 – liczba poprawnych prób, CBT4 – rozpiętość pamięci, BCST – procent poprawnych ruchów w BCST, TOL – stosunek ruchów wykonanych do minimalnej liczby ruchów w TOL.

Jako kolejne w tej serii sprawdzono, czy występuje związek pomiędzy zmianami w pamięci operacyjnej a zmianami w procesie pobudzania w grupie kontrolnej pasywnej. Wyniki tych analiz korelacji zawarto w tabeli 31.

Tabela 31

Korelacje zmian w pamięci operacyjnej a zmian w procesie pobudzania w grupie kontrolnej pasywnej

Grupa kontrolna pasywna		Zmiany w pamięci operacyjnej							
		PCW1	PCW2	CBT1	CBT2	CBT3	CBT4	BCST	TOL
Zmiany w procesie pobudzania									
CTT-1: czas WS	<i>rho</i> Spearmana	0,21	0,00	-0,11	0,00	0,00	0,00	0,40	-0,38
	istotność	0,276	1,000	0,551	0,996	0,993	0,993	0,027	0,036
CTT-2: czas WS	<i>rho</i> Spearmana	0,20	0,00	-0,10	-0,13	-0,12	-0,12	0,11	-0,08
	istotność	0,277	1,000	0,603	0,496	0,526	0,526	0,572	0,673
TOL: czas do wykonania pierwszego ruchu	<i>rho</i> Spearmana	0,09	0,25	-0,16	-0,09	-0,09	-0,09	-0,06	-0,13
	istotność	0,626	0,177	0,385	0,623	0,624	0,624	0,757	0,501
GNG: poprawne reakcje	<i>rho</i> Spearmana	0,16	-0,13	-0,06	0,10	0,12	0,12	0,18	-0,15
	istotność	0,407	0,494	0,757	0,604	0,527	0,527	0,350	0,442
GNG: średni czas reakcji poprawnej 1	<i>rho</i> Spearmana	-0,12	0,23	0,06	0,11	0,09	0,09	0,08	0,07
	istotność	0,516	0,217	0,762	0,563	0,642	0,642	0,692	0,708
GNG: średni czas reakcji poprawnej 2	<i>rho</i> Spearmana	-0,12	0,24	0,07	0,12	0,10	0,10	0,08	0,07
	istotność	0,516	0,197	0,728	0,532	0,609	0,609	0,665	0,713
GNG: reakcje poprawne 1	<i>rho</i> Spearmana	0,20	0,00	-0,05	-0,27	-0,29	-0,29	0,00	0,28
	istotność	0,281	1,000	0,799	0,146	0,116	0,116	0,983	0,140
GNG: reakcje poprawne 2	<i>rho</i> Spearmana	-0,03	0,17	-0,10	0,03	0,06	0,06	-0,12	-0,09
	istotność	0,855	0,379	0,609	0,865	0,738	0,738	0,511	0,652
GNG: suma opuszczeń	<i>rho</i> Spearmana	-0,11	-0,11	0,06	0,13	0,12	0,12	0,11	-0,12
	istotność	0,560	0,561	0,747	0,490	0,514	0,514	0,571	0,530
GNG: liczba opuszczeń 1	<i>rho</i> Spearmana	-0,20	0,00	0,05	0,27	0,29	0,29	0,00	-0,28
	istotność	0,281	1,000	0,799	0,146	0,116	0,116	0,983	0,140
GNG: liczba opuszczeń 2	<i>rho</i> Spearmana	0,03	-0,17	0,10	-0,03	-0,06	-0,06	0,12	0,09
	istotność	0,855	0,379	0,609	0,865	0,738	0,738	0,511	0,652

Adnotacja. PCW1 – Powtarzanie cyfr wprost, PCW2 – powtarzanie cyfr wspak, CBT1 – max. długość, CBT2 – suma punktów, CBT3 – liczba poprawnych prób, CBT4 – rozpiętość pamięci, BCTS – procent poprawnych ruchów w BCST, TOL – stosunek ruchów wykonanych do minimalnej liczby ruchów w TOL.

Przeprowadzona analiza wskazała na dwa istotne statystycznie związki wśród grupy kontrolnej pasywnej. Zmiana w obrębie CTT-1 jest powiązana dodatnio ze zmianą w BCST (procenta poprawnych ruchów) oraz ujemnie ze zmianą w TOL (stosunkiem ruchów wykonanych do minimalnej liczby ruchów). Obie te korelacje są o umiarkowanej sile. Im większe zmiany nastąpiły w zadaniu CTT-1, tym większa nastąpiła zmiana w procencie poprawnych ruchów w BCST, lecz mniejszy okazała się różnica dla stosunku ruchów wykonanych do minimalnej liczby ruchów (TOL). Nie odnotowano innych istotnych relacji w tej grupie.

Założono, że u zdrowych osób w okresie wczesnej dorosłości, im większa będzie poprawa pamięci operacyjnej, tym większa spodziewana poprawa w pozostałych procesach funkcji wykonawczych. Kolejno przetestowano, czy zmiany, które zaszły w pamięci operacyjnej są skorelowane ze zmianami w procesach hamowania (tabela 32).

Tabela 32

Korelacje zmian w pamięci operacyjnej ze zmianami w procesie hamowania przy podziale na warunek badawczy

Grupa	Zmiany w procesach hamowania (GNG)	Zmiany w pamięci operacyjnej									
		PCW1	PCW2	CBT1	CBT2	CBT3	CBT4	BCST	TOL		
E	GNG: błędne reakcje	<i>rho</i> Spearmana	0,00	-0,33	-0,27	-0,30	-0,32	-0,34	-0,44	0,11	
		istotność	0,968	0,072	0,154	0,108	0,087	0,063	0,016	0,553	
	GNG: średni czas reakcji błędnej 1	<i>rho</i> Spearmana	0,00	0,26	0,18	0,10	0,10	0,06	-0,14	0,00	
		istotność	0,986	0,174	0,330	0,606	0,616	0,772	0,465	0,993	
	GNG: średni czas reakcji błędnej 2	<i>rho</i> Spearmana	-0,13	0,26	0,13	0,08	0,11	0,04	-0,06	0,05	
		istotność	0,479	0,171	0,488	0,688	0,574	0,848	0,743	0,799	
	GNG: błędne reakcje: No Go 1	<i>rho</i> Spearmana	-0,10	-0,17	-0,19	-0,21	-0,21	-0,27	-0,27	0,04	
		istotność	0,582	0,363	0,303	0,267	0,264	0,147	0,142	0,845	
	GNG: błędne reakcje: No Go 2	<i>rho</i> Spearmana	-0,06	-0,36	-0,04	-0,15	-0,21	-0,25	-0,21	0,13	
		istotność	0,758	0,049	0,839	0,420	0,255	0,178	0,262	0,507	
	KA	GNG: błędne reakcje	<i>rho</i> Spearmana	0,07	0,22	0,04	0,08	0,08	0,08	-0,05	0,14
			istotność	0,694	0,236	0,830	0,674	0,669	0,669	0,785	0,450
GNG: średni czas reakcji błędnej 1		<i>rho</i> Spearmana	-0,16	0,11	0,17	0,10	0,08	0,08	-0,07	0,22	
		istotność	0,394	0,573	0,366	0,614	0,670	0,670	0,711	0,244	
GNG: średni czas reakcji błędnej 2		<i>rho</i> Spearmana	0,00	0,20	0,20	0,08	0,04	0,04	-0,07	0,20	
		istotność	0,984	0,298	0,292	0,664	0,847	0,847	0,711	0,301	
GNG: błędne reakcje: No Go 1		<i>rho</i> Spearmana	0,30	0,09	0,21	0,12	0,06	0,06	-0,01	0,07	
		istotność	0,109	0,627	0,263	0,529	0,735	0,735	0,941	0,731	
GNG: błędne reakcje: No Go 2		<i>rho</i> Spearmana	-0,07	0,08	-0,10	0,05	0,12	0,12	0,14	0,34	
		istotność	0,709	0,671	0,605	0,791	0,511	0,511	0,468	0,066	
KP		GNG: błędne reakcje	<i>rho</i> Spearmana	0,16	-0,13	-0,06	0,10	0,12	0,12	0,18	-0,15
			istotność	0,407	0,494	0,757	0,604	0,527	0,527	0,350	0,442
	GNG: średni czas reakcji błędnej 1	<i>rho</i> Spearmana	-0,06	0,34	0,16	0,08	0,04	0,04	0,07	0,02	
		istotność	0,746	0,068	0,391	0,680	0,851	0,851	0,729	0,902	
	GNG: średni czas reakcji błędnej 2	<i>rho</i> Spearmana	-0,12	0,23	0,09	0,15	0,12	0,12	0,08	0,06	
		istotność	0,516	0,217	0,640	0,439	0,513	0,513	0,685	0,759	
	GNG: błędne reakcje: No Go 1	<i>rho</i> Spearmana	-0,07	0,25	0,47	0,38	0,36	0,36	0,57	-0,04	
		istotność	0,730	0,177	0,009	0,038	0,048	0,048	0,001	0,844	
	GNG: błędne reakcje: No Go 2	<i>rho</i> Spearmana	0,06	-0,16	-0,24	-0,10	-0,08	-0,08	-0,26	0,09	
		istotność	0,739	0,390	0,206	0,586	0,678	0,678	0,158	0,624	

Adnotacja. Grupa: E – eksperymentalna, KA – kontrolna aktywna, KP – kontrolna pasywna; PCW1 – Powtarzanie cyfr wprost, PCW2 – powtarzanie cyfr wspak, CBT1 – max. długość, CBT2 – suma punktów, CBT3 – liczba poprawnych prób, CBT4 – rozpiętość pamięci, BCST – procent poprawnych ruchów w BCST, TOL – stosunek ruchów wykonanych do minimalnej liczby ruchów w TOL.

Dla procesu hamowania relacje istotne statystycznie odnotowano pomiędzy zmianą liczby błędnych reakcji a zmianą procenta prawidłowych ruchów w BCTS oraz różnicą liczbie błędnych reakcji w drugiej części zadania No-Go a powtarzaniem cyfr wspak w grupie eksperymentalnej. Obie te relacje są ujemne i umiarkowane. Ujemny znak korelacji oznacza, że im większe zmiany wystąpiły w błędnych reakcjach, tym mniejsze zmiany nastąpiły we wspomnianych zmianach w pamięci operacyjnych.

W grupie kontrolnej aktywnej nie odnotowano żadnego związku istotnego statystycznie. Zmiany w procesie hamowania nie są więc powiązane ze zmianami w pamięci operacyjnej wśród badanych z grupy kontrolnej aktywnej.

Z kolei w grupie kontrolnej pasywnej zmiany dotyczące liczby błędnych reakcji w pierwszej części zadania No-Go są skorelowane dodatnio ze zmianami w wynikach zadań CBT (związki umiarkowane) oraz BCST (związek silny). Dodatni charakter tych związków świadczy o tym, że im większe są zmiany w zakresie procesu hamowania w grupie kontrolnej pasywnej, tym większe zmiany odnotowano w pamięci operacyjnej.

Analogiczne korelacje wykonano, aby sprawdzić, czy zmiany w procesie kontroli działania są skorelowane ze zmianami w pamięci operacyjnej. w tabeli 33 zamieszczono wyniki tych analiz korelacji.

Tabela 33

Korelacje zmian w pamięci operacyjnej ze zmianami w procesie kontroli działania przy podziale na warunek badawczy

Grupa	Zmiany w procesie kontroli działania		Zmiany w pamięci operacyjnej							
			PCW1	PCW2	CBT1	CBT2	CBT3	CBT4	BCST	TOL
E	CTT: wskaźnik zakłóceń	<i>rho</i> Spearmana	0,02	0,28	-0,03	0,11	0,20	0,15	-0,35	0,04
		istotność	0,913	0,136	0,872	0,574	0,298	0,442	0,056	0,817
	BCST: błędy perseweracyjne	<i>rho</i> Spearmana	0,12	-0,04	-0,10	-0,09	-0,18	-0,08	0,23	0,08
		istotność	0,531	0,836	0,583	0,648	0,334	0,686	0,224	0,690
	BCST: błędy nieperseweracyjne	<i>rho</i> Spearmana	-0,04	-0,13	0,49	0,42	0,33	0,24	0,79	-0,08
		istotność	0,854	0,497	0,006	0,020	0,073	0,194	<0,001	0,664
	BCST: reakcje zgodne z koncepcją logiczną	<i>rho</i> Spearmana	0,23	0,16	0,46	0,24	0,21	0,11	0,49	-0,18
		istotność	0,224	0,405	0,011	0,193	0,271	0,559	0,006	0,334
	TOL: całkowity czas wykonania próby	<i>rho</i> Spearmana	0,32	0,02	0,12	0,09	0,02	-0,03	0,14	-0,01
		istotność	0,085	0,933	0,539	0,638	0,934	0,867	0,474	0,939
TOL: różnica ruchów wykonanych i minimalnej liczby ruchów	<i>rho</i> Spearmana	0,29	0,05	0,04	-0,05	-0,08	-0,07	-0,27	0,99	
	istotność	0,117	0,782	0,834	0,785	0,661	0,718	0,147	<0,001	
KA	CTT: wskaźnik zakłóceń	<i>rho</i> Spearmana	-0,14	-0,08	0,05	0,04	0,09	0,09	0,09	-0,13
		istotność	0,454	0,690	0,794	0,821	0,634	0,634	0,632	0,503
	BCST: błędy perseweracyjne	<i>rho</i> Spearmana	0,21	0,17	0,05	0,00	-0,06	-0,06	0,08	-0,09
		istotność	0,264	0,364	0,783	0,977	0,734	0,734	0,661	0,619
	BCST: błędy nieperseweracyjne	<i>rho</i> Spearmana	-0,27	-0,22	-0,02	0,11	0,17	0,17	0,42	0,32
		istotność	0,146	0,244	0,917	0,578	0,367	0,367	0,022	0,083
	BCST: reakcje zgodne z koncepcją logiczną	<i>rho</i> Spearmana	0,18	0,04	-0,34	-0,42	-0,41	-0,41	0,14	-0,02
		istotność	0,336	0,851	0,069	0,023	0,023	0,023	0,471	0,909
	TOL: całkowity czas wykonania próby	<i>rho</i> Spearmana	-0,02	-0,32	0,00	-0,09	-0,12	-0,12	-0,10	0,04
		istotność	0,920	0,087	0,997	0,632	0,515	0,515	0,585	0,838
TOL: różnica ruchów wykonanych i minimalnej liczby ruchów	<i>rho</i> Spearmana	-0,25	0,23	0,17	0,17	0,16	0,16	-0,03	0,36	
	istotność	0,181	0,213	0,368	0,360	0,392	0,392	0,870	0,052	
KP	CTT: wskaźnik zakłóceń	<i>rho</i> Spearmana	-0,04	0,02	0,08	-0,03	-0,02	-0,02	-0,32	0,43
		istotność	0,839	0,933	0,662	0,862	0,900	0,900	0,084	0,018
	BCST: błędy perseweracyjne	<i>rho</i> Spearmana	-0,28	0,13	0,03	0,19	0,23	0,23	0,30	0,00
		istotność	0,137	0,505	0,881	0,313	0,217	0,217	0,102	0,984
	BCST: błędy nieperseweracyjne	<i>rho</i> Spearmana	0,22	-0,03	0,12	-0,14	-0,18	-0,18	0,43	0,18
		istotność	0,251	0,868	0,514	0,467	0,354	0,354	0,017	0,355
	BCST: reakcje zgodne z koncepcją logiczną	<i>rho</i> Spearmana	0,09	-0,07	-0,16	-0,06	-0,03	-0,03	0,57	0,04
		istotność	0,626	0,698	0,403	0,744	0,874	0,874	0,001	0,821
	TOL: całkowity czas wykonania próby	<i>rho</i> Spearmana	0,00	-0,19	-0,29	-0,35	-0,32	-0,32	-0,13	0,00
		istotność	1,000	0,315	0,118	0,060	0,083	0,083	0,504	0,988
TOL: różnica ruchów wykonanych i minimalnej liczby ruchów	<i>rho</i> Spearmana	-0,05	-0,05	0,03	0,05	0,04	0,04	0,02	0,97	
	istotność	0,806	0,780	0,875	0,791	0,817	0,817	0,924	<0,001	

Adnotacja. Grupa: E – eksperymentalna, KA – kontrolna aktywna, KP – kontrolna pasywna; PCW1 – Powtarzanie cyfr wprost, PCW2 – powtarzanie cyfr wstak, CBT1 – max. długość, CBT2 – suma punktów, CBT3 – liczba poprawnych prób, CBT4 – rozpiętość pamięci, BCST – procent poprawnych ruchów w BCST, TOL – stosunek ruchów wykonanych do minimalnej liczby ruchów w TOL.

Korelacje dotyczące grupy eksperymentalnej wykazały, że zmiana w obrębie procenta błędów nieperseweracyjnych jest powiązana dodatnio ze zmianą maksymalnej długości i sumy punktów w CBT (związki umiarkowane), a także procenta poprawnych ruchów w BCST (związek silny). Ponadto zmiana procenta odpowiedzi na poziomie koncepcyjnym w BCST jest skorelowana także dodatnio ze zmianą w maksymalnej długości w CBT oraz procenta poprawnych ruchów w BCST (związki umiarkowane). Oznacza to, że wraz ze wzrostem zmiany w tej grupie wśród zadań dotyczących procesu kontroli działania, wzrasta zmiana dla zadań dotyczących pamięci operacyjnej. Jednocześnie odnotowano prawie pełną korelację pomiędzy zmianą w obrębie TOL: różnicy ruchów wykonanych a najmniejszej liczby ruchów oraz stosunku ruchów wykonanych do minimalnej liczby ruchów. Ze względu na dodatni znak relacji mowa o jednoczesnym wzroście obu wartości.

W grupie kontrolnej aktywnej zmiana dotycząca procenta błędów nieperseweracyjnych współwystępuje dodatnio ze zmianą procenta prawidłowych ruchów. Obie zmiany dotyczą BCST, a związek jest umiarkowany, co oznacza, że wraz ze zmianą błędów perseweracyjnych wśród osób z grupy kontrolnej aktywnej, wzrastają zmiany dotyczące prawidłowych ruchów. Jednocześnie zmiana w BCST dotycząca procenta odpowiedzi na poziomie koncepcyjnym jest powiązana ujemnie ze zmianą dotyczącą sumą punktów, poprawnymi próbami oraz rozpiętością pamięci (związki o umiarkowanej sile). Ujemny znak świadczy o tym, że im większe są zmiany w procencie odpowiedzi na poziomie koncepcyjnym w grupie kontrolnej aktywnej, tym mniej punktów badani uzyskują w CBT, co przekłada się na pamięć operacyjną.

Ponadto w grupie kontrolnej pasywnej związki odnotowano pomiędzy zmianą dotyczącą wskaźnika zakłóceń CTT a zmianą stosunku ruchów wykonanych do minimalnej liczby ruchów (TOL). Jednocześnie różnica występująca w BCST nawiązująca do procenta błędów nieperseweracyjnych i odpowiedzi na poziomie koncepcyjnym jest skorelowana z różnicą w procencie poprawnych ruchów. Ten ostatni związek jest silny, pozostałe są umiarkowane. Jednocześnie każdy z nich jest dodatni, co oznacza, że wraz ze wzrostem zmiany w obrębie BCST dotyczących procesu kontroli działania, wzrastają zmiany w BCST dotyczące pamięci operacyjnej. Analogicznie jak w grupie eksperymentalnej odnotowano prawie pełną korelację pomiędzy wskaźnikami TOL: różnicy ruchów wykonanych a najmniejszej liczby ruchów oraz stosunku ruchów wykonanych do minimalnej liczby ruchów.

3.5. Różnice międzypłciowe w zakresie różnic w funkcjach wykonawczych w zależności od grupy

W dalszym kroku sprawdzono, czy płeć różnicuje zmianę w funkcjach wykonawczych po przeprowadzonej stymulacji. w tym celu wykonano testy u Manna Whitneya. Różnice te sprawdzono jednak przy podziale na warunek badawczy. Zasadność użycia testu nieparametrycznego oparto o obecność licznych obserwacji odstających. Wyniki wszystkich testów okazały się nieistotne statystycznie. Oznacza to, że w żadnym przypadku płeć nie różnicuje zmian w funkcji wykonawczych po przeprowadzonej stymulacji i nie jest to zależne od badanej grupy. w tabelach 34–37 przedstawiono wyniki przeprowadzonych serii testów.

Tabela 34

Różnice międzypłciowe w zakresie pamięci operacyjnej przy podziale na warunek badawczy

Grupa	Różnice pomiarów	kobieta (n = 15)			mężczyzna (n = 15)			Z	p	η ²		
		średnia ranga	Me	Min.	Max.	średnia ranga	Me				Min.	Max.
E	PC: liczba poprawnych powtórzeń wprost	16,40	0,00	0,00	3,00	14,60	0,00	-1,00	2,00	-0,61	0,595	0,01
	PC: liczba poprawnych powtórzeń wspak	16,57	0,00	-1,00	1,00	14,43	0,00	-2,00	2,00	-0,75	0,512	0,02
	CBT: max. długość	17,07	1,00	0,00	3,00	13,93	0,00	0,00	4,00	-1,04	0,345	0,04
	CBT: suma punktów	17,10	13,00	-9,00	58,00	13,90	8,00	0,00	64,00	-1,01	0,325	0,04
	CBT: całkowita liczba poprawnych prób	17,37	2,00	-1,00	5,00	13,63	1,00	0,00	4,00	-1,20	0,250	0,05
	CBT: rozpiętość pamięci	16,70	0,50	-0,50	2,50	14,30	0,50	0,00	2,00	-0,78	0,461	0,02
	BCST: poprawne ruchy	17,40	4,86	-0,09	9,67	13,60	4,21	-3,02	8,28	-1,18	0,250	0,05
	TOL: stosunek ruchy wykonane/ minimalna liczba ruchów	13,70	0,10	-0,05	0,28	17,30	0,12	0,01	0,34	-1,12	0,267	0,04
KA	PC: liczba poprawnych powtórzeń wprost	15,87	0,00	0,00	2,00	15,13	0,00	0,00	3,00	-0,31	0,838	<0,01
	PC: liczba poprawnych powtórzeń wspak	15,97	0,00	-1,00	1,00	15,03	0,00	-1,00	1,00	-0,39	0,775	<0,01
	CBT: max. długość	14,70	0,00	-1,00	2,00	16,30	0,00	-1,00	3,00	-0,56	0,624	0,01
	CBT: suma punktów	15,80	0,00	-20,00	38,00	15,20	0,00	-5,00	36,00	-0,20	0,870	<0,01
	CBT: całkowita liczba poprawnych prób	15,63	0,00	-1,00	5,00	15,37	0,00	-1,00	4,00	-0,09	0,935	<0,01
	CBT: rozpiętość pamięci	15,63	0,00	-0,50	2,50	15,37	0,00	-0,50	2,00	-0,09	0,935	<0,01
	BCST: poprawne ruchy	14,07	-1,27	-4,66	1,61	16,93	-0,14	-2,90	1,91	-0,89	0,389	0,03
	TOL: stosunek ruchy wykonane/ minimalna liczba ruchów	15,47	0,00	0,00	0,10	15,53	0,00	-0,03	0,15	-0,02	1,000	<0,01
KP	PC: liczba poprawnych powtórzeń wprost	14,50	0,00	0,00	0,00	16,50	0,00	0,00	1,00	-1,44	0,539	0,07
	PC: liczba poprawnych powtórzeń wspak	13,63	0,00	-2,00	0,00	17,37	0,00	0,00	1,00	-1,97	0,250	0,13
	CBT: max. długość	15,87	0,00	-1,00	2,00	15,13	0,00	-1,00	3,00	-0,31	0,838	<0,01
	CBT: suma punktów	17,20	0,00	-13,00	26,00	13,80	0,00	-20,00	45,00	-1,36	0,305	0,06
	CBT: całkowita liczba poprawnych prób	17,13	0,00	-1,00	2,00	13,87	0,00	-1,00	3,00	-1,31	0,325	0,06
	CBT: rozpiętość pamięci	17,13	0,00	-0,50	1,00	13,87	0,00	-0,50	1,50	-1,31	0,325	0,06
	BCST: poprawne ruchy	15,33	0,08	-2,70	5,24	15,67	0,26	-3,26	2,57	-0,10	0,935	<0,01
	TOL: stosunek ruchy wykonane/ minimalna liczba ruchów	14,30	0,03	-0,05	0,12	16,70	0,04	-0,05	0,23	-0,75	0,461	0,02

Adnotacja. Grupa: E – eksperymentalna, KA – kontrolna aktywna, KP – kontrolna pasywna.

Tabela 35

Różnice międzypłciowe w zakresie procesu pobudzania w zależności od warunku badawczego

Grupa	Różnice pomiarów	kobieta (n = 15)			mężczyzna (n = 15)			Z	p	η ²		
		średnia ranga	Me	Min.	Max.	średnia ranga	Me				Min.	Max.
E	CTT-1: czas WS	17,23	6,00	0,00	22,00	13,77	5,00	0,00	12,00	-1,08	0,285	0,04
	CTT-2: czas WS	18,20	8,00	-11,00	32,00	12,80	3,00	-6,00	12,00	-1,69	0,098	0,10
	GNG: poprawne reakcje	14,10	7,00	-10,00	49,00	16,90	11,00	0,00	23,00	-0,87	0,389	0,03
	GNG: średni czas reakcji poprawnej 1	17,40	43,26	-41,60	100,72	13,60	37,75	-1,00	214,96	-1,18	0,250	0,05
	GNG: średni czas reakcji poprawnej 2	17,40	41,87	-15,55	99,71	13,60	32,49	-107,27	96,79	-1,18	0,250	0,05
	GNG: reakcje poprawne 1	17,33	0,00	-84,00	2,00	13,67	0,00	-1,00	0,00	-1,33	0,267	0,06
	GNG: reakcje poprawne 2	15,43	0,00	-2,00	2,00	15,57	-1,00	-4,00	3,00	-0,04	0,967	<0,01
	GNG: suma opuszczeń	14,07	0,00	-1,00	82,00	16,93	1,00	-3,00	6,00	-0,91	0,389	0,03
	GNG: liczba opuszczeń 1	13,67	0,00	-2,00	84,00	17,33	0,00	0,00	1,00	-1,33	0,267	0,06
	GNG: liczba opuszczeń 2	15,57	0,00	-2,00	2,00	15,43	1,00	-3,00	4,00	-0,04	0,967	<0,01
	TOL: czas do wykonania pierwszego ruchu	17,73	1569,00	-150,00	14339,00	13,27	985,00	-961,00	7866,00	-1,39	0,174	0,07
KA	CTT-1: czas WS	16,70	0,00	0,00	22,00	14,30	0,00	-2,00	12,00	-0,92	0,461	0,03
	CTT-2: czas WS	13,67	0,00	-6,00	9,00	17,33	0,00	-9,00	6,00	-1,19	0,267	0,05
	GNG: poprawne reakcje	16,63	1,00	-1,00	5,00	14,37	0,00	-2,00	5,00	-0,72	0,486	0,13
	GNG: średni czas reakcji poprawnej 1	16,33	31,77	25,56	73,76	14,67	35,42	18,91	49,06	-0,52	0,624	0,09
	GNG: średni czas reakcji poprawnej 2	16,33	31,07	25,00	72,13	14,67	34,39	18,55	47,98	-0,52	0,624	0,09
	GNG: reakcje poprawne 1	15,13	0,00	-1,00	1,00	15,87	0,00	0,00	1,00	-0,31	0,838	0,06
	GNG: reakcje poprawne 2	15,20	0,00	-2,00	2,00	15,80	0,00	-2,00	1,00	-0,20	0,870	0,04
	GNG: suma opuszczeń	16,33	1,00	-3,00	2,00	14,67	0,00	-1,00	2,00	-0,54	0,624	0,10
	GNG: liczba opuszczeń 1	15,87	0,00	-1,00	1,00	15,13	0,00	-1,00	0,00	-0,31	0,838	0,06
	GNG: liczba opuszczeń 2	15,80	0,00	-2,00	2,00	15,20	0,00	-1,00	2,00	-0,20	0,870	0,04
	TOL: czas do wykonania pierwszego ruchu	15,47	861,00	419,86	11951,94	15,53	836,22	444,36	5537,28	-0,02	1,000	<0,01
KP	CTT-1: czas WS	17,57	0,00	0,00	8,00	13,43	0,00	-4,00	6,00	-1,49	0,202	0,08
	CTT-2: czas WS	15,00	0,00	-6,00	5,00	16,00	0,00	-5,00	9,00	-0,32	0,775	<0,01
	GNG: poprawne reakcje	16,40	1,00	-1,00	2,00	14,60	0,00	-1,00	5,00	-0,60	0,595	0,01
	GNG: średni czas reakcji poprawnej 1	16,53	43,38	-7,95	53,52	14,47	35,42	12,38	58,25	-0,64	0,539	0,01
	GNG: średni czas reakcji poprawnej 2	16,47	41,21	-7,77	52,35	14,53	34,36	12,10	56,97	-0,60	0,567	0,01
	GNG: reakcje poprawne 1	14,00	0,00	-1,00	0,00	17,00	0,00	-1,00	0,00	-1,12	0,367	0,04
	GNG: reakcje poprawne 2	13,60	-1,00	-2,00	0,00	17,40	0,00	-1,00	1,00	-1,33	0,250	0,06
	GNG: suma opuszczeń	18,23	1,00	0,00	3,00	12,77	0,00	-1,00	2,00	-1,88	0,089	0,12
	GNG: liczba opuszczeń 1	17,00	0,00	0,00	1,00	14,00	0,00	0,00	1,00	-1,12	0,367	0,04
	GNG: liczba opuszczeń 2	17,40	1,00	0,00	2,00	13,60	0,00	-1,00	1,00	-1,33	0,250	0,06
	TOL: czas do wykonania pierwszego ruchu	14,07	654,00	-179,19	4505,20	16,93	1287,00	93,30	5843,00	-0,89	0,389	0,03

Adnotacja. Grupa: E – eksperymentalna, KA – kontrolna aktywna, KP – kontrolna pasywna.

Tabela 36

Różnice międzypłciowe w zakresie procesu hamowania przy podziale na warunek badawczy

Grupa	Różnice pomiarów (GNG)	kobieta (n = 15)			mężczyzna (n = 15)			Z	p	η ²		
		średnia ranga	Me	Min.	Max.	średnia ranga	Me				Min.	Max.
E	GNG: błędne reakcje	16,63	7,00	-10,00	59,00	14,37	11,00	0,00	30,00	-0,72	0,486	0,13
	GNG: średni czas reakcji błędnej 1	15,53	28,53	-3,73	82,24	15,47	25,98	-36,69	81,77	-0,02	1,000	<0,01
	GNG: średni czas reakcji błędnej 2	16,53	10,19	-19,10	84,10	14,47	31,52	-0,84	146,35	-0,64	0,539	0,12
	GNG: błędne reakcje: No Go 1	14,97	3,00	-8,00	9,00	16,03	5,00	-1,00	13,00	-0,35	0,744	0,06
	GNG: błędne reakcje: No Go 2	16,60	2,00	-15,00	11,00	14,40	3,00	-1,00	11,00	-0,70	0,512	0,13
	GNG: błędne reakcje	16,63	1,00	-1,00	5,00	14,37	0,00	-2,00	5,00	-0,72	0,486	0,13
KA	GNG: średni czas reakcji błędnej 1	15,53	24,00	13,56	64,17	15,47	24,90	10,27	41,83	-0,02	1,000	<0,01
	GNG: średni czas reakcji błędnej 2	16,53	26,53	21,34	61,96	14,47	29,58	15,79	40,96	-0,64	0,539	0,12
	GNG: błędne reakcje: No Go 1	14,97	1,00	-1,00	2,00	16,03	1,00	0,00	3,00	-0,35	0,744	0,06
	GNG: błędne reakcje: No Go 2	16,60	0,00	-2,00	4,00	14,40	0,00	-4,00	2,00	-0,70	0,512	0,13
	GNG: błędne reakcje	16,40	1,00	-1,00	2,00	14,60	0,00	-1,00	5,00	-0,60	0,595	0,01
	GNG: średni czas reakcji błędnej 1	15,80	33,02	-7,63	47,16	15,20	30,84	1,71	47,96	-0,19	0,870	<0,01
KP	GNG: średni czas reakcji błędnej 2	16,53	36,22	-6,75	45,38	14,47	29,58	10,52	48,64	-0,64	0,539	0,01
	GNG: błędne reakcje: No Go 1	15,13	0,00	-2,00	2,00	15,87	0,00	-1,00	2,00	-0,24	0,838	<0,01
	GNG: błędne reakcje: No Go 2	15,23	-1,00	-4,00	2,00	15,77	-1,00	-2,00	6,00	-0,17	0,870	<0,01
	GNG: błędne reakcje	16,40	1,00	-1,00	2,00	14,60	0,00	-1,00	5,00	-0,60	0,595	0,01

Adnotacja. Grupa: E – eksperymentalna, KA – kontrolna aktywna, KP – kontrolna pasywna.

Tabela 37

Różnice międzyplciowe w zakresie procesu kontroli działania przy podziale na warunki badawczy

Grupa	Różnice pomiarów	kobieta (n = 15)				mężczyzna (n = 15)				Z	p	η ²
		średnia ranga	Me	Min.	Max.	Średnia ranga	Me	Min.	Max.			
E	CTT: wskaźnik zakłóceń	16,67	-0,13	-0,54	0,20	14,33	-0,15	-0,50	0,17	-0,73	0,486	0,02
	BCST: błędy perseweracyjne	14,07	1,12	-2,14	10,27	16,93	1,79	-0,35	3,94	-0,89	0,389	0,03
	BCST: błędy nieperseweracyjne	17,27	1,62	-2,01	9,25	13,73	0,52	-4,84	9,30	-1,10	0,285	0,04
	BCST: reakcje zgodne z koncepcją logiczną	15,53	8,23	-1,02	20,54	15,47	9,68	2,13	14,52	-0,02	1,000	<0,01
	TOL: całkowity czas wykonania	17,93	31,58	2,00	182,22	13,07	16,90	-25,10	140,70	-1,51	0,137	0,08
	TOL: różnica ruchów wykonanych i minimalnej liczby ruchów	14,07	6,00	-2,00	16,00	16,93	6,00	0,00	17,00	-0,90	0,389	0,03
	KA	CTT: wskaźnik zakłóceń	13,13	-0,08	-1,28	0,06	17,87	0,00	-0,59	0,35	-1,51	0,148
BCST: błędy perseweracyjne		15,00	-0,31	-2,63	3,07	16,00	0,23	-6,00	3,49	-0,31	0,775	0,06
BCST: błędy nieperseweracyjne		15,33	-1,31	-6,75	4,17	15,67	-0,22	-2,68	6,33	-0,10	0,935	0,02
BCST: reakcje zgodne z koncepcją logiczną		13,73	0,06	-5,23	5,33	17,27	1,35	-6,85	4,37	-1,10	0,285	0,20
TOL: całkowity czas wykonania		16,70	4,26	-6,83	31,34	14,30	4,01	-3,00	17,63	-0,75	0,461	0,14
TOL: różnica ruchów wykonanych i minimalnej liczby ruchów		15,07	0,00	-1,00	0,00	15,93	0,00	-2,00	4,00	-0,52	0,806	0,09
KP		CTT: wskaźnik zakłóceń	13,00	-0,06	-0,37	0,00	18,00	0,00	-0,29	0,69	-1,57	0,126
	BCST: błędy perseweracyjne	16,33	-0,56	-4,12	5,71	14,67	-0,48	-6,04	1,97	-0,52	0,624	<0,01
	BCST: błędy nieperseweracyjne	14,20	0,63	-4,96	4,10	16,80	1,07	-2,72	6,72	-0,81	0,436	0,02
	BCST: reakcje zgodne z koncepcją logiczną	15,87	0,56	-2,42	6,14	15,13	0,55	-4,59	2,90	-0,23	0,838	<0,01
	TOL: całkowity czas wykonania	12,97	1,06	-9,51	54,84	18,03	3,76	-4,49	14,59	-1,58	0,116	0,09
	TOL: różnica ruchów wykonanych i minimalnej liczby ruchów	14,63	2,00	-2,00	6,00	16,37	3,00	-2,00	11,00	-0,55	0,595	0,01

Adnotacja. Grupa: E – eksperymentalna, KA – kontrolna aktywna, KP – kontrolna pasywna.

Przeprowadzone analizy wykazały, że płeć nie ma związku z wielkością poprawy w zakresie badanych funkcji.

4. Dyskusja

Przeznaczona stymulacja prądem stałym (tDCS) jest metodą, która jest przedmiotem intensywnych badań dotyczących możliwości i skuteczności jej zastosowań. Badania prowadzone u osób zdrowych mają na celu przede wszystkim ocenę jej przydatności i skuteczności jako formy stymulacji poznawczej oraz lepsze poznanie mechanizmu jej działania. Przyjmując, że stymulacja funkcjonowania poznawczego młodych dorosłych ma na celu optymalizację ich wydolności umysłowej, tDCS może być narzędziem pomocnym w sprośtaniu stawianym przed nimi wymaganiami, np. w obszarze związanym z pracą zawodową. Jednocześnie takie działania mają charakter protekcyjny i pozwalają budować rezerwę poznawczą (Negash i in., 2013; Stern, 2012). Warto zauważyć, że choć istnieją publikacje dotyczące jednokrotnej stymulacji tDCS u zdrowych dorosłych w literaturze naukowej, to procesy zmian wywołanych przez tę formę stymulacji są oparte na plastyczności mózgu i wymagają wielokrotnych powtórzeń, aby osiągnąć zamierzone efekty. Dlatego też niniejsze badanie skupia się na wielokrotnej stymulacji tDCS.

W przeprowadzonym badaniu wzięło udział 90 osób w okresie wczesnej dorosłości. Uczestnicy zostali podzieleni na trzy równoliczne grupy: 1. grupę eksperymentalną, która uczestniczyła w 10 sesjach stymulacji tDCS; 2. grupę kontrolną aktywną, która otrzymywała podczas 10 sesji stymulację nieaktywną (sham; placebo; stymulację nieaktywną); 3. grupę kontrolną pasywną, która nie uczestniczyła w żadnych oddziaływaniach. Każdy badany przeszedł dwukrotną ocenę funkcjonowania poznawczego: przed rozpoczęciem udziału w cyklu stymulacji oraz po jej zakończeniu. Pierwszy pomiar odbywał się 1–3 dni przed pierwszą stymulacją, natomiast drugi pomiar przeprowadzano 1–3 dni po zakończonym cyklu. Razem przeprowadzono 780 spotkań z badanymi.

Osoby z grupy eksperymentalnej uczestniczyły w dziesięciu 30-minutowych sesjach stymulacji tDCS, podczas których podawany był prąd o natężeniu 2 mA, z okresem narastania i spadania po 20 sekund. Montaż elektrod był następujący: anoda: F3, katoda: Fp2. Użyto okrągłych elektrod gąbkowych o powierzchni 25 cm². Grupa kontrolna aktywna również uczestniczyła w 10 spotkaniach, w trakcie których uczestniczyła w cyklu, którego procedura była identyczna, jak w grupie eksperymentalnej. Jediną różnicą było to, że badani otrzymywali narastający prąd jedynie w ciągu pierwszych 20 sekund, aby nie byli świadomi, do której grupy zostali przydzieleni. Celem było zapewnienie warunków w grupie placebo jak najbardziej zbliżonych do warunków aktywnej stymulacji, aby uczestnicy nie mogli rozpoznać, w jakiej

grupie się znajdują. Włączenie do badań grupy kontrolnej aktywnej pozwoliło na wnioskowanie o tym, iż zmiany obserwowane w grupie eksperymentalnej wynikają z oddziaływania czynnika eksperymentalnego, a nie z efektu placebo (Boot i in., 2013). w grupie kontroli pasywnej przeprowadzono dwukrotną ocenę funkcjonowania poznawczego w odstępie 14-16 dni. Uczestnicy tej grupy nie otrzymywali żadnej formy stymulacji tDCS ani żadnego innego rodzaju interwencji aktywnej. Celem zastosowania tej grupy kontrolnej było umożliwienie porównania wyników grupy eksperymentalnej z grupą, która nie otrzymywała żadnej formy stymulacji, co umożliwiło kontrolowanie efektu powtórnego pomiaru/wprawy/uczenia się.

Celem przeprowadzonych badań było ocena wpływu przezczaszkowej stymulacji prądem stałym na procesy funkcji wykonawczych osób zdrowych w okresie wczesnej dorosłości. w przyjętym modelu badawczym zmienną niezależną była stymulacja tDCS (aktywna vs placebo). Natomiast zmienne zależne stanowiły procesy funkcji wykonawczych tj. pamięć operacyjna, proces pobudzania, hamowania oraz kontroli działania. w badaniu kontrolowano również zmienne socjodemograficzne, takie jak płeć i wiek osób badanych. w ramach prowadzonych analiz oceniano wpływ stymulacji tDCS na wyżej wymienione procesy funkcji wykonawczych. Ponadto sprawdzono, czy płeć różnicuje wyniki w zakresie wielkości poprawy po stymulacji.

Przyjęty w pracy podział procesów funkcji wykonawczych stanowił podstawę do wyłonienia następujących problemów badawczych:

1. Przechaszkowa stymulacja prądem stałym (tDCS) w montażu anoda F3, katoda Fp2, wpływa na funkcje wykonawcze u zdrowych osób w okresie wczesnej dorosłości.
2. Występowanie związku pomiędzy wyjściowym poziomem mierzonych zmiennych (tj. pamięci operacyjnej, procesu pobudzania, hamowania oraz kontroli działania) a wielkością zmiany po przebytej stymulacji tDCS u zdrowych osób dorosłych w okresie wczesnej dorosłości.
3. Występowanie związku pomiędzy wielkością zmiany w pamięci operacyjnej a wielkością zmian w innych procesach funkcji wykonawczych po przebytej stymulacji tDCS u zdrowych osób dorosłych w okresie wczesnej dorosłości.

Stymulowany anodowo w niniejszym badaniu obszar, tj. grzbietowo-boczna kora przedczołowa (*Dorsolateral Prefrontal Cortex; DLPFC*), na poziomie neuronalnym, jest

związany z procesami pamięci operacyjnej (Smith i Jonides, 1998). w związku z tym przyjęto, że największa poprawa po serii stymulacji tDCS nastąpi właśnie w zakresie procesu pamięci operacyjnej. Bazując na podziale stosowanym w badaniach neurofizjologicznych przez Kropotova (Habich i in., 2021; Leshikar i in., 2017) sprawdzono również, czy efekty stymulacji wykazują transfer na inne procesy funkcji wykonawczych, czyli proces pobudzania, hamowania oraz kontroli działania.

4. Występowanie związku pomiędzy płcią a wielkością poprawy w badanych obszarach procesów funkcji wykonawczych.

4.1. Wpływ stymulacji tDCS na funkcje wykonawcze

W dalszej części opisano wpływ stymulacji na pamięć operacyjną, proces pobudzania, hamowania oraz kontroli działania.

4.1.1. tDCS a pamięć operacyjna

Pamięć operacyjna stanowi swoisty klucz do właściwego funkcjonowania człowieka. Związany z nią obszar kory przedczołowej wyposażony jest w neurony, które charakteryzują się zdolnością do utrzymywania aktywacji przez dłuższy czas – zarówno w trakcie trwania bodźca czy danego wydarzenia, jak i długo po zakończeniu tego oddziaływania (Pąchalska i in., 2021; Riley i Constantinidis, 2016). Właśnie ten obszar mózgu zaangażowany jest w przechowywanie reprezentacji bodźców lub działań przez pewien czas. Oznacza to, że informacje dotyczące bodźców zewnętrznych lub wewnętrznych oraz planowane działania mogą być przechowywane dzięki aktywności tej części mózgu przez pewien czas. Poprzez zdolność przechowywania i manipulowania informacjami DLPFC umożliwia utrzymanie celów w pamięci operacyjnej i podejmowanie odpowiednich działań, zgodnie z ustalonymi celami. Dzięki temu, podczas wykonywania działań, ten obszar może pełnić funkcję „magazynu” informacji niezbędnych do osiągnięcia celów (Martin i in., 2021). w rezultacie obszar DLPFC odgrywa kluczową rolę w utrzymaniu spójności i kierunku działań, a także w integrowaniu informacji potrzebnych do skutecznego osiągnięcia długoterminowych celów.

Dotychczasowe badania wskazują, że aktywność kory przedczołowej jest zarówno konieczna, jak i wystarczająca do utrzymania informacji w pamięci operacyjnej (Riley i Constantinidis, 2016). Warto podkreślić, że pojęcie pamięci operacyjnej implikuje aktywne przetwarzanie przechowywanej tymczasowo informacji, a to z kolei ma zasadnicze znaczenie

dla takich działań poznawczych, jak planowanie, podejmowanie decyzji czy porozumiewanie się (Pąchalska i in., 2021).

W przeprowadzonym badaniu własnym analizowano następujące wskaźniki, wchodzące w skład pamięci operacyjnej:

1. Rozpiętość (zakres) pamięci operacyjnej mierzona liczbą poprawnie odtworzonych elementów w CBT (aspekt wzrokowo-przestrzenny) oraz liczbą poprawnych powtórzeń w zadaniu PC wprost (aspekt słuchowo-werbalny). Według niektórych badaczy takie wskaźniki rozpiętości pamięci operacyjnej mogą być postrzegane jako wymiar bufora uwagi. Bufor uwagi odgrywa rolę w utrzymaniu i manipulowaniu informacjami w pamięci operacyjnej, zapewniając tym samym funkcjonowanie procesów wykonawczych. w tym kontekście uwaga jest uważana za niezbędny element pamięci operacyjnej, umożliwiając skuteczne przechowywanie i manipulację informacjami.
2. Poprawność utrzymania informacji w pamięci i wykonania operacji na tych informacjach wyrażoną:
 - liczbą poprawnie powtórzonych cyfr w zadaniu PC wstak, która odnosi się do utrzymania, odwracania i manipulowania informacjami słuchowo-werbalnymi. Stanowi miarę skuteczności manipulacji informacjami w pamięci oraz zdolności do reorganizacji nowo zapamiętanych informacji;
 - całkowitą liczbą poprawnych prób w CBT, stanowiącą miarę zapamiętywania, utrzymywania i manipulowania informacjami wzrokowo-przestrzennymi w krótkotrwałej pamięci operacyjnej;
 - sumą punktów w CBT, która wskazuje na poprawność utrzymania większej liczby wzrokowo-przestrzennych informacji w pamięci operacyjnej, co można interpretować jako wskaźnik skuteczności pamięci wzrokowo-przestrzennej;
 - procentem poprawnie wykonanych ruchów w BCST, odzwierciedlającym skuteczność w zapamiętywaniu zmieniających się reguł i dostosowywaniu się do nowych warunków.
 - stosunkiem ruchów wykonanych do minimalnej liczby ruchów w TOL, związanym z umiejętnością zapamiętania i manipulowania informacjami w sposób efektywny mówi o tym, czy osoba badana jest w stanie zapamiętać i manipulować informacjami w sposób efektywny. Odzwierciedla on skuteczność utrzymania i zarządzania informacjami w pamięci operacyjnej i efektywnego podejmowania decyzji w kontekście planowania i przewidywania.

W badaniu własnym uzyskane wyniki po aktywnej stymulacji tDCS wykazały istotną poprawę dotyczącą pamięci operacyjnej we wszystkich badanych wskaźnikach, z wyjątkiem liczby poprawnie powtórzonych cyfr wspak. Analizując wyniki w odniesieniu do wskaźników oceniających zakres pamięci operacyjnej, potwierdzono, że stymulacja tDCS spowodowała wzrost rozpiętości pamięci operacyjnej. Dotyczy to zarówno modalności słuchowo-werbalnej, jak i wzrokowo-przestrzennej. Osoby otrzymujące aktywną stymulację tDCS uzyskały wyższe wyniki w zadaniu PC wprost mierzącym zakres pamięci słuchowo-werbalnej niż osoby z pozostałych grup. Różnica ujawniła się tylko w drugim pomiarze. Sugeruje to, że uzyskana poprawa była wynikiem samej stymulacji, a nie rezultatem działania innych czynników, np. placebo czy efektu wprawy. Jest to wynik sprzeczny z wcześniejszymi doniesieniami. w przeprowadzonych przez Jeon i Han (2012) badaniach nie odnotowano różnicy w przypominaniu sobie ciągu cyfr, czyli rozpiętości pamięci słuchowo-werbalnej. w przytoczonym badaniu podobne wyniki uzyskano pomiędzy stymulacją anodową a stymulacją placebo, zarówno przy stymulacji okolic lewej, jak i prawej kory przedczołowej. Jednym z argumentów przedstawianych w celu wyjaśnienia braku obserwowanego efektu w badaniach Jeon i Han (2012) było twierdzenie, że maksymalna rozpiętość pamięci słuchowo-werbalnej wynosząca dziewięć elementów jest niewystarczająca do wykazania różnic w wynikach u zdrowych osób w okresie wczesnej dorosłości. Jednak w badaniu własnym maksymalna rozpiętość pamięci również obejmowała dziewięć elementów. Rozbudowanie zadania o kolejne elementy do zapamiętania z pewnością zwiększyłoby czułość narzędzia. Jednocześnie warto zwrócić uwagę na różnicę między badaniami Jeon i Han (2012) a badaniami własnymi, gdyż mogą mieć one wpływ na wyniki oraz interpretację efektów stymulacji. Przede wszystkim zastosowano różne parametry stymulacji: wielkość elektrod (35 cm^2 w cytowanym badaniu vs 25 cm^2 w badaniu własnym), podawane natężenia prądu (1 mA vs 2 mA w badaniu własnym), czas stymulacji (20 min vs 30 min). Może to mieć istotne znaczenie dla uzyskanych rezultatów. Można podejrzewać, że użycie mniejszych elektrod przy jednoczesnym podawaniu większego natężenia prądu pozwoliło precyzyjniej i silniej pobudzić obszar odpowiedzialny za pamięć operacyjną. Ponadto wydłużony czas stymulacji pozwolił na dłuższe utrzymywanie się wzmożonej aktywności neuronalnej w stymulowanym obszarze mózgu.

W przeprowadzonym badaniu istotnie poprawiło się funkcjonowanie osób badanych z grupy eksperymentalnej w zakresie efektywności pracy na materiale wzrokowo-

przestrzennym. Jedynie u osób, które otrzymywały aktywną stymulację tDCS, istotnie zwiększyła się maksymalna liczba zapamiętanych bodźców wzrokowo-przestrzennych oraz poprawiła się dokładność utrzymania tych informacji w pamięci operacyjnej. Zadania polegające na zapamiętywaniu i przechowywaniu informacji przestrzennych, np. położenia kropek w matrycy czy kolejności podświetlanych kwadratów na planszy, wymagają dużego wysiłku i silnie angażują procesy kontrolne pamięci operacyjnej (Orzechowski, 2012). Okazuje się, że tego typu zadania wysoko korelują z innymi, bardziej standardowymi miarami pamięci operacyjnej i można je uznać za dobre testy pamięci operacyjnej (Oberauer, 2005; Orzechowski, 2012). Istnieje kilka czynników, które mogą wpływać na wyniki uzyskane w teście CBT. Zadanie CBT mierzy funkcjonowanie notesu wzrokowo-przestrzennego (*visuospatial sketchpad*). Model pamięci roboczej Baddeleya (2003) sugeruje, że notes wzrokowo-przestrzenny wraz z pętlą fonologiczną stanowi system przechowywania informacji w pamięci operacyjnej, który z kolei podlega nadzorowi centralnego systemu wykonawczego (*central executive*). Trudno jest jednoznacznie określić, czy zwiększenie obciążenia pamięci wzrokowo-przestrzennej, wymagania dotyczące wydobywania informacji czy nieskuteczna strategia utrzymania informacji przyczyniają się do gorszych wyników w teście. Analogicznie, trudno jest jednoznacznie określić, co przyczynia się do poprawy w wykonaniu tego zadania. Jest to wynik interakcji różnych czynników. Można tu zaliczyć skuteczne strategie utrzymania informacji, np. organizowanie lub wizualizowanie wzrokowo-przestrzennych elementów. Umiejętność efektywnego utrzymywania informacji oraz stosowanie zoptymalizowanych strategii przetwarzania zadań może przyczynić się do zwiększenia liczby poprawnie odtworzonych elementów (Ripp i in., 2022; Vandierendonck i in., 2004). z kolei skupienie uwagi na wykonywanym zadaniu i skuteczne kontrolowanie swojej uwagi, przyczynia się do lepszego przetwarzania informacji wzrokowo-przestrzennych, co pozwala na poprawę zapamiętywania i wydobywania z pamięci zapamiętanych informacji. Bazuje to na podstawowej funkcjonalności pamięci operacyjnej polegającej na utrzymywaniu informacji w sposób aktywny, stabilny, ale również elastyczny (Bledowski i in., 2010). Wskazana funkcjonalność neuronalnie jest powiązana ze stymulowanym obszarem. Badania bazujące na neuroobrazowaniu podkreślają rolę kory przedczołowej (*prefrontal cortex*; PFC) w wytwarzaniu sygnałów odgórnych, które wpływają na poziomy aktywności neuronalnej, a tym samym na przepływ przetwarzania informacji w innych obszarach mózgu (Miller i Cohen, 2001). Taka odgórna modulacja jest prawdopodobnie kluczowym mechanizmem

leżącym u podstaw pamięci operacyjnej (Baddeley, 1986; Baddeley i in., 2020; Baddeley i Hitch, 1994).

Podsumowując, po cyklu stymulacji, osoby badane skuteczniej radziły sobie w zadaniach angażujących pamięć operacyjną w modalności wzrokowo-przestrzennej. Uzyskane wyniki mogą wskazywać na większą zdolność do zapamiętywania dłuższych ciągów informacji wzrokowo-przestrzennych oraz zwiększoną poprawność działania i rozwiązywania problemów angażujących zasoby w tej modalności. Prawdopodobnie jest to związane z poprawą umiejętności do utrzymania w pamięci i manipulowania informacjami na temat obowiązujących reguł w danym zadaniu. Uzyskane wyniki mogą ponadto wskazywać na większą zdolność do przełączania się między zadaniami, bez negatywnego efektu interferencji.

Osoby z grupy eksperymentalnej uzyskały istotną poprawę w skuteczności zapamiętywania zmieniających się reguł i dostosowywaniu się do nowych warunków. Uzyskane efekty były umiarkowanie silne. Osoby otrzymujące stymulację tDCS lepiej wykonywały zadania wymagające elastycznego dostosowania się do nowych zasad, co z kolei wiąże się z większą efektywnością działania. Stymulacja tDCS miała wpływ na zdolność do szybkiego przyswajania nowych reguł, integrowania ich z istniejącymi informacjami w pamięci operacyjnej oraz skutecznego stosowania ich w działaniu. Poprawa elastycznego dostosowywania się do nowych reguł może przekładać się na większą efektywność pamięci operacyjnej. Osoby z grupy eksperymentalnej po cyklu stymulacji okazały się bardziej skuteczne w zachowaniu i manipulowaniu informacjami niezbędnymi do osiągnięcia celów oraz w utrzymaniu spójności działań w czasie. Uzyskana poprawa w elastycznym dostosowywaniu się do nowych warunków wskazuje na efektywniejsze funkcjonowanie pamięci operacyjnej. Uzyskane wyniki są szczególnie istotne, biorąc pod uwagę wiek osób badanych, czyli wczesną dorosłość. Poprawa w elastycznym dostosowywaniu się do nowych warunków może mieć istotne implikacje zarówno dla sfery zawodowej, jak i społecznej życia. Skuteczne przetwarzanie informacji i umiejętne podejmowanie decyzji są kluczowe w wielu dziedzinach życia, a uzyskana poprawa może przyczynić się do zwiększenia efektywności funkcjonowania w tych obszarach.

Na szczególną uwagę zasługuje wynik wyrażony procentem poprawnych ruchów w BCST. Jedynie w grupie eksperymentalnej doszło do istotnej poprawy w tym wskaźniku. Co więcej, uzyskana siła efektu jest bardzo silna. Stymulacja tDCS wpłynęła na poprawę efektywności funkcjonowania pamięci operacyjnej w zakresie zapamiętywania i adaptacji do

zmieniających się reguł. Osoby po zakończonym cyklu lepiej utrzymywały w pamięci aktualne zasady oraz skuteczniej niż przed stymulacją wykorzystywały te informacje w podejmowaniu decyzji. Można to rozumieć jako zwiększenie elastyczności w dostosowywaniu się do nowych warunków oraz zdolności do monitorowania zmian w regułach, utrzymywania ich w pamięci operacyjnej i skutecznego wykorzystywania ich w podejmowaniu decyzji.

W każdej z badanych grup w drugim pomiarze w porównaniu z pierwszym odnotowano zmniejszenie stosunku ruchów wykonanych do minimalnej liczby ruchów w TOL. Prawdopodobnie świadczy to o tym, że wskaźnik ten jest podatny na efekt wprawy. Nabyte doświadczenie i wcześniejsza znajomość zadania wpłynęły na wypracowanie efektywniejszych strategii rozwiązania zadania TOL. Jednocześnie biorąc pod uwagę wyłącznie wyniki uzyskane przez osoby badane w drugim pomiarze i porównując je między grupami, jedynie osoby z grupy eksperymentalnej miały istotnie niższy stosunek ruchów wykonanych do minimalnej liczby ruchów w TOL w porównaniu z pozostałymi grupami. Niższy wynik w tym wskaźniku oznacza lepsze funkcjonowanie. Wskazuje to, że stymulacja tDCS przyczyniła się do poprawy w zapamiętywaniu i utrzymywaniu informacji w pamięci oraz podejmowaniu decyzji opartych na planowaniu.

Procesy pamięci operacyjnej obejmują wiele funkcji, takich jak kodowanie, utrzymanie, przypominanie i rozpoznawanie (J. Wang i in., 2018). w przeprowadzonym badaniu uczestnicy nie zwiększyli liczby poprawnie powtórzonych cyfr wspan. Oznacza to, że nie zaobserwowano istotnej poprawy w procesach związanych z manipulacją informacjami w pamięci oraz zdolnością do reorganizacji nowo zapamiętanych informacji związanych z modalnością słuchowo-werbalną. Nie zaobserwowano w tym aspekcie istotnych różnic między dwoma pomiarami dla całej grupy osób badanych, ale okazało się, że osoby, które nie były poddawane oddziaływaniom, cechowały się niższą wartością w średniej z obu pomiarów niż osoby otrzymujące stymulację tDCS. Uzyskane efekty miały umiarkowaną siłę. Należy podkreślić, że te wyniki odnoszą się jedynie do modalności słuchowo-werbalnej, a mierzony wskaźnik jest związany z bardziej złożonymi procesami niż sama rozpiętość pamięci operacyjnej. Do podobnych wniosków, że stymulacja tDCS w różnych wariantach nie poprawia wydajności w modalności werbalno-słuchowej pamięci operacyjnej doszli również inni badacze (Teo i in., 2011; Wang i in., 2018). Wang z zespołem (2018) nie uzyskał różnicy w rezultatach osiągniętych przez grupę aktywną w porównaniu z grupą placebo przy stymulacji anodowej, czyli pobudzającej. Natomiast w obu grupach zanotowano tendencję statystyczną do poprawy w badanym obszarze. Takiego efektu nie wykazano z kolei przy stymulacji katodowej, czyli

hamującej aktywność (Teo i in., 2011; J. Wang i in., 2018). w związku z tym, że w przypadku powtarzanych pomiarów dotyczących pamięci operacyjnej ujawnia się tendencja do poprawy wykonania zadania, można podejrzewać, że zadziałał efekt wprawy, czyli efekt uczenia się (J. Wang i in., 2018).

Zadanie PC wspaniale, w którym osoby badane nie poprawiły swoich wyników, angażuje zarówno procesy uwagowe, jak i umiejętność tworzenia sekwencji w porządku odwrotnym. Nie należy tych wskaźników traktować jako ogólnej miary pamięci (Golden, 1979b; Hornowska, 2004). Wynik w omawianym zadaniu mogą obniżać dystraktory sytuacyjne czy też napięcie emocjonalne (Kucharska-Pietura i in., 2012). Jednocześnie, nie wydaje się zasadnym upatrywanie braku zmiany właśnie w tych przyczynach. Czynniki sytuacyjne musiałyby wówczas zadziałać przy obydwu pomiarach. Ponadto musiałyby one być tak silne, że zniwelowałyby efekt stymulacyjny. Bardziej prawdopodobne tłumaczenie wskazuje na różnicę między zadaniami typu n-back w modalności słuchowo-werbalnej (Au i in., 2016; Friehs i Frings, 2019; Karthikeyan i in., 2021; Ruf i in., 2017), które są wykorzystywane do badania pamięci operacyjnej, również w kontekście stymulacji tDCS a zadaniami typu powtarzanie cyfr. Zadania n-back wymagają rozpoznania w ciągu kolejno prezentowanych bodźców powtórzeń tylko na określonej, na przykład drugiej – 2-back czy trzeciej – 3-back, pozycji od końca ciągu. Oprócz przechowywania w pamięci zbioru prezentowanych bodźców badany musi po każdej ekspozycji bodźca aktualizować zbiór, gdyż z każdym kolejnym elementem zmienia się element na pozycji n-back (Orzechowski, 2012). Zadania polegające na powtarzaniu cyfr wymagają od badanych wygenerowania lub przypomnienia sobie poprzedniej informacji w mechanizmie swobodnego odtwarzania, podczas gdy w zadaniach typu n-back badani wybierają przedmioty, które były wcześniej prezentowane, a zatem przypomnienie zachodzi w mechanizmie odtwarzania przez rozpoznawanie. Być może tDCS wzmacnia pamięć operacyjną w większym stopniu, gdy wymagana jest szybkość rozpoznawania, a nie swobodnego przypomnienia (Redick i Lindsey, 2013). Uzyskane wyniki w przeprowadzonym badaniu wydają się to potwierdzać.

Reasumując, uzyskane dane potwierdziły częściowo dotychczasowe doniesienia, według których stymulacja lewego obszaru grzbietowo-bocznej kory przedczołowej poprawia funkcjonowanie pamięci operacyjnej zarówno w populacji zdrowej, jak i klinicznej. Już jedne z pierwszych badań nad usprawnianiem funkcjonowania poznawczego przy pomocy tDCS, które prowadził Fregni z zespołem (2005), wykazały, że anodowa stymulacja lewej DLPFC znacząco poprawia dokładność odpowiedzi podczas aktywnej stymulacji w porównaniu

z grupą placebo. Co więcej, różnica ta występowała jedynie przy stymulacji anodowej, a przy katodowej już nie. Wyniki te potwierdzają, że wzmocnienie pobudzenia aktywności korowej w obszarze DLPFC może wpływać na skuteczność pamięci operacyjnej. Anodowa stymulacja tDCS polega na podawaniu prądu o ładunku dodatnim do mózgu przez elektrodę umieszczoną na skórze nad obszarem DLPFC. Podawany prąd wpływa na aktywność neuronów w obszarze docelowym. Anodowa stymulacja tDCS w omawianym montażu zwiększa pobudliwość neuronów w obszarze DLPFC poprzez depolaryzację błon komórkowych. Depolaryzacja polega na zwiększeniu różnicy potencjałów elektrycznych na błonie komórkowej, co zwiększa szansę na wyzwolenie potencjału czynnościowego i przekazywanie sygnałów między neuronami. w rezultacie dochodzi do zwiększenia aktywności neuronalnej w obszarze DLPFC.

Dodatkowo anodalna stymulacja tDCS może wpływać na plastyczność synaptyczną, czyli zdolność synaps do modyfikacji swojej siły połączenia. Stymulacja ta może zwiększać aktywność receptorów N-metylo-D-asparaginianowych (NMDA), które odgrywają kluczową rolę w przekazywaniu sygnałów między neuronami oraz w procesach związanych z plastycznością synaptyczną, uczeniem się i pamięcią. Zwiększenie aktywności receptorów NMDA prowadzi do zwiększonego napływu jonów wapnia do neuronów i inicjacji procesów plastyczności synaptycznej (Polanowska i Seniów, 2010). To z kolei może prowadzić do poprawy funkcjonowania sieci neuronalnych związanych z pamięcią operacyjną.

W wielu późniejszych badaniach porównywano czynniki, takie jak umiejscowienie elektrody, gęstość prądu i czas trwania stymulacji, które mogą wpływać na skuteczność tDCS (Ke i in., 2019). Na ich podstawie potwierdzono skuteczność anodowej stymulacji DLPFC w zwiększaniu wydajności pamięci operacyjnej (Au i in., 2016b; Boehringer i in., 2013; Coffman i in., 2014; Gözenman i Berryhill, 2016; Hill i in., 2016; Richmond i in., 2014; Ruf i in., 2017; Talsma i in., 2017). Badania neuroobrazowe z wykorzystaniem elektroencefalografii (EEG) i funkcjonalnej spektroskopii bliskiej podczerwieni (fNIRS) dostarczają dowodów, że stymulacja tDCS może zmieniać aktywność mózgu (Bogaard i in., 2019; Jang i in., 2019; Jones i in., 2017).

Niektórzy badacze wysuwają wnioski, że anodowa stymulacja lewego obszaru grzbietowo-bocznej kory przedczołowej może selektywnie poprawić wyniki w trudnych zadaniach poznawczych. Tłumaczone jest to tym, że wynik może być osiągnięty poprzez ogniskową poprawę funkcji wykonawczych i/lub zdolności poznawczych. gdy zadania są

trudne, a nie poprzez poprawę poziomu pobudzenia i/lub czujności (Pope i in., 2015). Częściowo ma to potwierdzenie w badaniach własnych.

4.1.2. tDCS a proces pobudzenia

Pojęcie pobudzenia w kontekście funkcji wykonawczych wiąże się z aktywacją neuronów w korze czołowo-ciemieniowej. Zapewnia ono planowanie i wykonanie danego działania (Kropotov, 2009b; Pąchalska i in., 2019).

W przeprowadzonym badaniu własnym analizowano następujące wskaźniki wchodzące w skład procesu pobudzenia:

- wskaźnik przeszukiwania pola wzrokowego i utrzymania pobudzenia wyrażony czasem wykonania CTT-1 oraz liczbą poprawnych reakcji w GNG (część 1 i 2);
- zdolność aktywowania procesu pobudzenia wyrażoną w średnim czasie prawidłowej reakcji w zadaniu GNG (część 1 i 2);
- wskaźnik skuteczności koncentrowania zasobów uwagi na bodźcach, które są istotne, przy jednoczesnym ignorowaniu podobnych bodźców oraz szybkości przetwarzania informacji i skuteczności podejmowania decyzji wyrażona czasem wykonania CTT-2;
- czas potrzebny do zaplanowania działania wyrażony czasem do wykonania pierwszego ruchu w zadaniu TOL. Ten wskaźnik informuje o tempie przetwarzania informacji, co przekłada się na czas potrzebny na analizę sytuacji, generowanie planów działania oraz przewidywanie konsekwencji ruchów.

W procesie pobudzenia, biorąc pod uwagę wyniki wszystkich grup, istotnie skrócił się czas do wykonania pierwszego ruchu w drugim pomiarze w porównaniu z pierwszym. Oznacza to, że zarówno w grupie eksperymentalnej, jak i otrzymującej placebo oraz w grupie bez oddziaływań skrócił się czas inicjowania działania, a uzyskany efekt jest silny. Jednakże można przypuszczać, że na poprawę wyniku w tym zadaniu miał również wpływ efekt uczenia się czy inaczej efekt wprawy (Schapkin i in., 2007). w pre-teście dla osób badanych zadanie jest zupełnie nowe. Ponowne podejście do tego typu zadania sprawia, że problem do rozwiązania nie jest już zupełnie nowy. Pomimo tego, że zastosowano w post-teście wersję równoległą tego zadania, to i tak osoby badane istotnie skróciły czas do wykonania pierwszego ruchu, co mogło wynikać ze znajomości reguł wykonania zadania. Osoby badane przy drugim pomiarze efektywniej niż za pierwszym razem przetwarzały uzyskane informacje, co przełożyło się na szybsze zaplanowanie i obranie odpowiedniej strategii rozwiązania zadania.

W badaniu własnym zaobserwowano również różnice w zdolnościach utrzymania pobudzenia, co przekładało się na szybkość wykonywanych zadań. Średnia wyników w grupie kontrolnej pasywnej była niższa niż w grupie eksperymentalnej dla testów CTT-1 i CTT-2, a także niższa niż w grupie kontrolnej aktywnej dla testu CTT-1. Warto tutaj zwrócić uwagę, że w tym wskaźniku zaobserwowano różnicę między grupami w momencie przystąpienia do badań. Średnia czasu wykonania tego zadania u osób z grupy eksperymentalnej była nieznacznie wyższa niż w pozostałych dwóch grupach. Wyniki w zakresie poprawnych reakcji były wyższe w grupie eksperymentalnej w porównaniu z grupami kontrolnymi. Ponadto tylko grupa eksperymentalna doświadczyła wzrostu wyników w zakresie liczby poprawnych reakcji po stymulacji. Stymulacja tDCS przyczyniła się do poprawy w zakresie przeszukiwania pola wzrokowego i utrzymania pobudzenia.

Interesującym rezultatem uzyskanym w badaniu własnym, jest fakt, że o ile czas poprawnych reakcji w teście GNG nie uległ skróceniu we wszystkich grupach i różnice między poszczególnymi grupami okazały się nieistotne, o tyle liczba poprawnych reakcji w tym teście w istotny sposób zwiększyła się po stymulacji. Może to świadczyć o korzystnym wpływie aktywnej stymulacji na poprawę dokładności wykonania zadania, w którym konieczne jest szybkie adekwatne reagowanie pobudzeniem i hamowaniem. Przeprowadzone analizy wykazały występowanie istotnych różnic w poprawnych reakcjach w zadaniu GNG w pre-teście i post-teście względem grup. Największa poprawa w wykonaniu zadania wystąpiła w grupie eksperymentalnej.

W teście CTT-2, który jest trudniejszy, ponieważ wymaga przełączania się pomiędzy zadaniami, uzyskano istotne skrócenie czasu potrzebnego na zakończenie zadania sukcesem. w post-teście znacząco lepiej poradziły sobie osoby po aktywnej stymulacji tDCS. Te zmiany potwierdzają, że zastosowanie tDCS usprawnia proces pobudzania, co przekłada się na lepsze, czyli efektywniejsze wykonania zadań o różnym poziomie złożoności.

Dotychczasowe badania nie dają jednoznacznych wyników, w jaki sposób przeczaszkowa stymulacja prądem stałym wpływa na procesy związane z pobudzaniem. Badania prowadzone przez Dockery z zespołem (2009) wykazały, że zarówno anodowa, jak i katodowa stymulacja tDCS mogą poprawić wydajność planowania i utrzymania tego wykonania. w przytoczonym badaniu dane pokazują specyficzne dla fazy treningu efekty tDCS. Autorzy sugerują, że katodowa stymulacja, która zmniejsza pobudliwość, pośredniczy w swoim wczesnym korzystnym efekcie poprzez redukcję szumów aktywności neuronalnej.

z kolei dalsza adaptacyjna konfiguracja określonych połączeń neuronalnych jest wspierana przez wzmacniający pobudliwość anodowy tDCS dopiero w późniejszej fazie treningu. Taka stymulacja zwiększa skuteczność aktywnych połączeń. Autorzy tego badania obserwowali utrzymujący się wzrost funkcji nawet 6 i 12 miesięcy po treningu. Inne badania wskazują na rolę aktywacji lewego obszaru grzbietowo-bocznej kory przedczołowej na skuteczność rozwiązywania problemów. Wyraża się to zmniejszoną liczbą błędnych ruchów, które wymagają kontroli uwagi nad bodźcami (Miller i Cohen, 2001). Uzyskane w badaniu własnym wyniki są również zgodne z badaniami pokazującymi poprawę po stymulacji tDCS w zakresie zdolności planowania w zadaniach angażujących planowanie rozwiązań sytuacji problemowych (Dockery i in., 2009; Heinze i in., 2014). Sytuacje problemowe odnoszą się do zadań lub sytuacji, w których osoba musi zidentyfikować problem, wygenerować różne możliwości rozwiązania i wybrać najbardziej odpowiednie działanie w celu osiągnięcia zamierzonego celu. Mogą to być zadania matematyczne, logiczne, kreatywne lub inne rodzaje problemów, które wymagają elastycznego myślenia, analizy sytuacji i podejmowania decyzji. Stymulacja tDCS była badana jako potencjalna metoda poprawy zdolności planowania w tego rodzaju sytuacjach problemowych. Badania sugerują, że poprzez wpływ na aktywność mózgu, zwłaszcza obszaru przedczołowego, stymulacja tDCS może zwiększać elastyczność poznawczą, kreatywność i skuteczność w rozwiązywaniu problemów. Oznacza to, że osoby poddane stymulacji tDCS mogą wykazywać lepsze umiejętności planowania, generowania rozwiązań i podejmowania decyzji w trudnych sytuacjach problemowych, co odzwierciedla poprawę w zakresie procesu pobudzania.

4.1.3. tDCS a proces hamowania

Hamowanie jest procesem niejednorodnym i odnosi się do różnych zjawisk. w ogólnej definicji hamowanie poznawcze jest zdolnością systemu poznawczego do „wyłączenia” procesu, który w konkretnej sytuacji jest niepożądany lub zbyt kosztowny (Nęcka i in., 2020). Umiejętność zahamowania działania stanowi jeden z najbardziej istotnych składników funkcji wykonawczych (Kropotov, 2009a; Kropotov i in., 2011; Kropotov i Mueller, 2012). Mózg człowieka stanowi układ odbierający informacje z otoczenia. Co więcej, te informacje są poddawane różnym modyfikacjom i działaniom, a także mogą być skonfrontowane z zawartością pamięci długotrwałej (Jaśkowski, 2009). Konsekwencją tego są określone zachowania. Jak podaje Jaśkowski (2009), przykładem może być tutaj regulacja ciśnienia krwi przez podwzgórze. Takie działania charakteryzuje pełna automatyczność procesów przetwarzania i nie jest przy nich wymagana kontrola poznawcza. w kontekście funkcji

wykonawczych i kontroli poznawczej większe znaczenia mają procesy wtórnie automatyczne (Jaśkowski, 2009; Nęcka i in., 2020), czyli takie, które stają się automatyczne na skutek treningu czy ćwiczeń. Nabywanie wprawy przyczynia się do tego, że procesy pierwotnie nieautomatyczne stają się niezależne od świadomej kontroli systemu poznawczego (Jaśkowski, 2009; Schneider i Shiffrin, 1977; Shiffrin i Schneider, 1977). Mimo automatyzacji tych czynności, nadal są one intencjonalne i celowe. Automatyzacja pozwala zmniejszyć wysiłek poznawczy, który jest konieczny do realizacji tych działań (Jaśkowski, 2009; Nęcka i in., 2020). Trafne porównanie czynności wtórnie zautomatyzowanych przytacza Jaśkowski (Jaśkowski, 2009). Porównuje on czynności wtórnie zautomatyzowane do działania automatycznego pilota w samolocie. Pozwala on na kontynuowanie lotu w sytuacjach przewidywalnych, czyli w znanych i precyzyjnie określonych warunkach. Podobnie czynność automatyczna pozwala na poprawne i szybkie wykonanie zadania, za które odpowiada, o ile warunki zadania nie są zmienione. w innym przypadku konieczny jest mechanizm kontrolny wyższego rzędu, aby dane zadanie zakończyć sukcesem (Nęcka i in., 2020). Jak podkreślają Pąchalska, i in. (2019) bardzo ważną rolę w przebiegu funkcji wykonawczych odgrywa kontrola. Dotyczy to zarówno samego aktu działania, jak i uzyskanych wyników. Kontrola działania przejawia się zarówno z odraczaniem reakcji, ich hamowaniem, jak i przełączaniem się na inne zadanie. Przy zaburzeniu któregośkolwiek z tych czynników obserwuje się zachowania impulsywne, trudne czy nawet niemożliwe do zahamowania. Trudność sprawia również przejście od jednej do drugiej czynności. w rezultacie działanie ulega dezintegracji i traci celowy, ukierunkowany charakter (D'Esposito i in., 2006; Pąchalska i in., 2019; Walsh i in., 2016).

Do badania procesu hamowania wybrano następujące wskaźniki:

- zdolność zaprzestania wtórnie automatycznej reakcji wyrażoną w liczbie błędnych reakcji w zadaniu *Go/No-Go* (GNG). Uzyskane wyniki mówią o tym, na ile osoba jest w stanie efektywnie powstrzymać się od reagowania na bodźce lub impulsy, które są niewłaściwe lub niepożądane w danym kontekście-
- zdolność aktywowania procesu hamowania wyrażoną w średnim czasie błędnej reakcji w zadaniu *Go/No-Go* (GNG).

Wyniki uzyskane w badaniu własnym w zakresie procesu hamowania, podobnie jak w procesie pobudzania wskazują, że stymulacja tDCS nie wpływa na czas reakcji. u osób badanych nie zmienił czas błędnej reakcji, czyli czas reakcji na bodziec, na który nie powinni reagować. Natomiast u osób w grupie eksperymentalnej znacząco zmniejszyła się liczba

błędnych reakcji w drugim pomiarze w porównaniu z pierwszym. Oznacza to, że jedynie aktywna stymulacja, a nie stymulacja placebo czy efekt wprawy, usprawniła proces hamowania, wyrażający się w zdolności do szybkiego zaprzestania działania, gdy zmieniają się warunki. Różnice zaobserwowano w sumie błędnych reakcji z pierwszej i drugiej części zadania. w tym wskaźniku grupa eksperymentalna uzyskała mniej błędnych reakcji ogólnie ze średniej obu pomiarów niż grupy kontrolne. Natomiast w drugiej części zadania GNG błędne reakcje występowały rzadziej jako średnia obu pomiarów w grupie eksperymentalnej niż w grupie kontrolnej pasywnej. Poza tym, nie odnotowano innych istotnych różnic.

Badani z grupy ze stymulacją tDCS uzyskali wyniki wskazujące na mniejszą liczbę popełnionych błędów niż badani z obu grup kontrolnych. Siła efektu jest duża dla ogólnego wyniku spadku błędów w całym zadaniu oraz dla liczby błędów w pierwszej części zadania, natomiast dla drugiej części zadania efekt ten jest umiarkowany. Dotychczasowe badania sugerują się, że DLPFC odgrywa kluczową rolę w hamowaniu kontroli nad przetwarzaniem sensorycznym poprzez tłumienie nieistotnych informacji. Wpisuje się to w hipotezę rozpraszalności funkcji przedczołowej, która została zaproponowana przez Bartusa i Levere (1977) w odniesieniu do modelu zwierzęcego. Zgodnie z tą hipotezą, DLPFC działa jak filtr, który eliminuje niepotrzebne i rozpraszające informacje, umożliwiając skupienie się na istotnych aspektach w danej sytuacji. Hipoteza została potwierdzona przez badania z udziałem ludzi, w których stwierdzono, że uszkodzenia DLPFC mogą prowadzić do trudności w hamowaniu nieistotnych bodźców i rozpraszaniu uwagi (Knight i in., 1989, 1999). Badania nad stymulacją tDCS potwierdzają, że stymulacja anodowa sprzyja zwiększeniu poprawności reakcji w sytuacjach konfliktowych. Badania prowadzone przez Zmigrod z zespołem (2016) sprawdzały zaangażowanie prawego obszaru grzbietowo-bocznej kory przedczołowej w sytuacjach konfliktowych. Opisane sytuacje były związane z niezgodnością bodźca z bodźcem lub niezgodnością bodźca i reakcji. Okazało się, że prawy obszar grzbietowo-bocznej kory przedczołowej jest zaangażowany w sytuacje konfliktowe wynikające głównie z niezgodności bodźca z bodźcem, a nie konfliktem niezgodności bodziec-reakcja. Podkreśla to subtelne, ale ważne różnice między paradygmatami eksperymentalnymi, które często zakładają wykorzystywanie jednego proces. Inni badacze (Leite i in., 2013) również zwrócili uwagę na subtelne różnice w procesie hamowania dotyczące impulsywności, czyli zdolności do kontrolowania natychmiastowych reakcji i powstrzymywania się od nieodpowiednich lub niepożądanych działań. Badania wskazują, że stymulacja anodowa obszaru grzbietowo-bocznego kory przedczołowej może poprawiać zdolność jednostki do hamowania

impulsywności, co przekłada się na większą kontrolę zachowań i lepsze podejmowanie decyzji w sytuacjach konfliktowych. Zaobserwowano w nich również istotną rolę hamowania interferencji, związaną z redukowaniem wpływu nieistotnych informacji na bieżące zadanie lub reakcję. w tym kontekście stymulacja anodowa może wspomagać proces hamowania interferencji, umożliwiając skupienie uwagi na istotnych informacjach i efektywne przetwarzanie danych w sytuacjach, w których występuje konflikt informacyjny. Ponadto badania podejmują temat hamowanie automatyzacji, rozumiane jako kontrolowanie automatycznych lub nawykowych reakcji i zastępowania ich bardziej elastycznymi i przemyślanymi działaniami. Stymulacja anodowa może wpływać na proces hamowania automatyzacji, umożliwiając osobie bardziej elastyczne i adaptacyjne podejście do sytuacji problemowych, które wymagają świadomego planowania i podejmowania decyzji (Leite i in., 2013). Leite z zespołem (2013) w swoim badaniu ocenił wpływ różnych montażu stymulacji tDCS na wykonanie zadań z zakresu kontroli hamowania. Stosując jednopółkulową vs dwupółkulową tDCS do dolnego zakrętu czołowego (*inferior frontal gyrus*; IFG), okazało się, że jednostronna tDCS w prawym obszarze poprawiła dokładność reakcji, kosztem szybkości reakcji. Wybierając lewy obszar grzbietowo-bocznej kory przedczołowej do stymulacji anodowej, Nejati z zespołem (2018) wykazali wzrost wydajności w wykonywanych zadaniach, większą dokładność i krótszy czas reakcji w zadaniach angażujących procesy hamowania. w badaniach własnych nie uzyskano poprawy w zakresie szybkości reakcji, ale pozostałe wyniki są zbieżne.

W kontekście przyszłych badań, warto skupić się na porównaniu efektów stymulacji tDCS w różnych regionach mózgu, takich jak DLPFC, obszar przyśrodkowy mózdzku czy inne obszary związane z procesami hamowania. Analiza różnic między tymi obszarami może dostarczyć informacji na temat ich roli i wkładu w kontrolę hamowania. Ponadto, warto również badać trwałość efektów stymulacji tDCS, aby ocenić, czy wpływ stymulacji jest przejściowy czy może prowadzić do trwałych zmian w zdolności do powstrzymywania się od reakcji. Takie systematyczne porównania pomogą w lepszym zrozumieniu interakcji między stymulacją tDCS a kontrolą hamowania w różnych kontekstach konfliktowych. w szerszej perspektywie, takie badania mogą przyczynić się do stworzenia skuteczniejszych strategii terapeutycznych, treningu poznawczego i poprawy kontroli emocjonalnej poprzez wykorzystanie stymulacji tDCS w celu zwiększenia zdolności jednostki do skutecznego powstrzymywania się od niepożądanych reakcji w sytuacjach konfliktowych.

4.1.4. tDCS a proces kontroli działania

Umiejętności planowania są wstępnym warunkiem skutecznego rozwiązywania problemów i efektywnego zachowania. Proces kontroli działania obejmuje porównywanie wyników wykonywanego działania z wcześniejszym planem. Ma to na celu identyfikację ewentualnych rozbieżności i podjęcie odpowiednich kroków w celu dostosowania działania. Zatem osoba dokonuje oceny i analizy wyników swojego działania, porównując je z oczekiwanymi rezultatami. Do badania procesu kontroli działania wybrano następujące wskaźniki:

- trudności w płynnej kontroli działania wyrażone przez wskaźnik zakłóceń w teście CTT oraz całkowity czas wykonania zadania TOL;
- trudności w realizacji zadań ujawniające się poprzez popełnianie błędów wyrażone we wskaźnikach: procent błędów perseweracyjnych i procent błędów nieperseweracyjnych w zadaniu BCST;
- efektywność w zakresie rozwiązywania zadań problemowych rozumianą jako umiejętność utrzymania instrukcji w pamięci i postępowania zgodnie z przyjętą regułą wykonania zadania wyrażoną w procencie reakcji zgodnych z koncepcją logiczną w zadaniu BCST oraz różnicy ruchów wykonanych i minimalnej liczbie ruchów w teście TOL.

W badaniu własnym po aktywnej stymulacji tDCS skrócił się czas wykonania oraz zwiększyła się efektywność w zakresie rozwiązywania zadań problemowych. Potwierdza to wcześniejsze doniesienia, że stymulacja anodowa zwiększa efektywność w zakresie kontroli działania w zadaniach bardziej złożonych. Jednocześnie, dane uzyskane z badań własnych wykazały, że zwiększyła się różnica między czasem wykonania zadania prostszego i czasem wykonania zadania bardziej złożonego, wymagającego większej kontroli poznawczej. Jest to związane z większą poprawą w zakresie szybkości wykonania zadania prostszego w porównaniu z wykonaniem zadania trudniejszego, silniej angażującego funkcje wykonawcze, w tym proces kontroli działania. Zatem stymulacja prawdopodobnie silniej wpływa na bardziej elementarne funkcje lub łatwiej taką zmianę jest uchwycić. Interesującym wynikiem jest to, że w tym samym wskaźniku, czyli wskaźniku zakłóceń, mierzonym czasem wykonania zadania prostszego i trudniejszego, nie odnotowano istotnych różnic między

grupami. Prawdopodobnie można to tłumaczyć efektem uczenia się we wszystkich badanych grupach, co przełożyło się na szybsze wykonanie prostego, znanego już zadania.

W pozostałych mierzonych wskaźnikach procesu kontroli działania wystąpiły natomiast istotne statystycznie różnice w pre-teście i post-teście między grupami. Dotyczyły one różnicy ruchów wykonanych i minimalnej liczby ruchów w teście TOL, co może być rozumiane jako efektywność w kontroli i rozwiązywaniu zadań problematycznych. Skrócił się też czas wykonania tego zadania. w zadaniu BCST z kolei wyniki różnią się w zależności od grupy w zakresie błędów perseweracyjnych i nieperseweracyjnych oraz reakcji zgodnych z koncepcją logiczną. Oznacza to, że u osób otrzymujących stymulację tDCS doszło do znaczącego wzrostu efektywności w zakresie rozwiązywania zadań problemowych. Osoby z grupy eksperymentalnej przejawiały większą elastyczność w działaniu ukierunkowanym na konkretny cel. Prawdopodobnie było to związane z łatwiejszą manipulacją informacjami, co przełożyło się na uzyskiwane przez osoby badane wyniki.

Zdolność planowania, a następnie skutecznej kontroli działania jest uznawana za ważny wskaźnik nabywania umiejętności poznawczych (Peretti i in., 2002). Przy wyższych poziomach obciążenia zadaniami badania neuroobrazowe wskazują na aktywność grzbietowo-bocznej kory przedczołowej jako najbardziej krytycznej struktury do rozwiązania zadań problemowych, również takich, jakie wykorzystano w badaniu własnym (Baker i in., 1996; Dagher i in., 1999; Dockery i in., 2009; Lazeron i in., 2004; Owen, 1997; Rainville i in., 2002; Rasser i in., 2005; Van Den Heuvel i in., 2005). Badania sugerują, że głównie lewa część kory przedczołowej jest silnie zaangażowana w zadania dotyczące pamięci operacyjnej (Olesen i in., 2004; H. Walter i in., 2007) oraz w sytuacje problemowe do rozwiązania (Morris i in., 1993; Owen i in., 1996; Rowe i in., 2001; Schall i in., 2003; Van Den Heuvel i in., 2003). Większa aktywność tego obszaru wiąże się też z lepszym wykonaniem zadań angażujących proces kontroli wykonania zadania (Cazalis i in., 2003, 2006). Jednym z interesujących doniesień z wcześniejszych badań, jest odkrycie, że zarówno anodowa, jak i katodowa stymulacja tDCS przyczynia się do poprawy zdolności kontroli działania, co określono ilościowo na podstawie wykonania zadania TOL. Jednakże, czego początkowo nie zakładano, efekty te zależą od fazy uczenia się. Stymulacja tDCS może mieć większy wpływ na poprawę wyników w początkowych fazach uczenia się, gdy strategie i umiejętności są rozwijane, niż w późniejszych fazach, gdy uczestnicy są już bardziej zaawansowani w zadaniu (Bartl i in., 2023).

4.2. Początkowy poziom funkcjonowania poznawczego a efektywność stymulacji

Wyniki wcześniejszych badań wskazują, że wiek i poznawcza wydajność wyjściowa wpływają na efekt stymulacji tDCS, szczególnie, selektywnie poprawa obserwowana jest u starszych dorosłych i osób z mniejszą wydajnością wyjściową (Berryhill i Jones, 2012). w badaniu własnym w większości zmiennych potwierdzono, że im niższy wynik wyjściowy, tym większą poprawę obserwuje się przy drugim pomiarze. Zależności te występują również przy stymulacji nieaktywnej i w grupie bez oddziaływań. Prawdopodobnie uwidocznił się tutaj efekt sufitowy. Uczestnicy przeprowadzonego badania to osoby młode o wysokim poziomie funkcjonowania poznawczego. Do podobnych wniosków doszedł Luque-Casado z zespołem (2019). Badał on efekty anodowej stymulacji tDCS vs stymulacji nieaktywnej nad lewym obszarem grzbietowo-bocznej kory przedczołowej. Ocenę pamięci operacyjnej testem n-back przeprowadzono bezpośrednio po stymulacji i 10 minut po zakończeniu oddziaływania. Analiza wszystkich badanych wykazała, że anodowa tDCS nie poprawiła wyników w zakresie pamięci operacyjnej. z kolei analiza skupień ujawniła obecność podgrupy osób badanych, która znacząco poprawiła swoje wyniki po zastosowaniu anodowej, ale nie po pozorowanej stymulacji tDCS. Nie stwierdzono jednak istotnej poprawy wyników po anodowej stymulacji tDCS u osób z najlepszymi wynikami wyjściowymi. Uzyskane w tym badaniu rezultaty sugerują, że efekty stymulacji tDCS zależne są od różnic indywidualnych i podkreślają potrzebę lepszych sposobów optymalizacji podejść metodologicznych w celu uwzględnienia zmienności międzyosobniczej i dokładnej oceny wartości dowodowej wyników poznawczych związanych z tDCS. Efekt uzyskany po stymulacji tDCS zależy od wyjściowego stanu elektrofizjologicznego przed interwencją. Badania wskazują, że stymulacja prowadzi do większej modulacji fizjologii i zachowania u osób z wyjściowymi sygnaturami fizjologicznymi wskazującymi na mniej adaptacyjne przetwarzanie, ponieważ pozwalają one na większy zakres modulacji (Dubreuil-Vall i in., 2019). Do podobnych wniosków doprowadziły przeprowadzone badania własne. Zaobserwowano zależność między niższym wyjściowym wynikiem w zakresie badanych funkcji a większą poprawą w drugim pomiarze. Co więcej, taka tendencja ujawniła się we wszystkich grupach, a w grupie eksperymentalnej była najsilniejsza i dotyczyła największej liczby mierzonych wskaźników. w grupie otrzymującej aktywną stymulację zaobserwowano korelację między wyjściowym poziomem mierzonych zmiennych a wielkością poprawy od bardzo silnej do umiarkowanej siły związku.

Najnowsze badania nad skutecznością stymulacji tDCS wskazują, że zmiany w neurofizjologii i zachowaniu zależą od stanu fizjologicznego przed interwencją, co podkreśla zależną od stanu wyjściowego dynamikę modulacji funkcji wykonawczych. Być może warto te wyniki rozpatrywać w kategorii ograniczeń badania własnego. Osoby badane w momencie przystąpienia do badań nie były zróżnicowane pod względem mierzonych funkcji. Były to osoby w okresie wczesnej dorosłości, w normie intelektualnej. Wszystkie osoby badane miały wykształcenie średnie lub wyższe, uczyły się i/lub pozostawały aktywne zawodowo. Można zatem rozważać uzyskane wyniki, mówiące o związku między początkowym pomiarem a wielkością zmiany w drugim pomiarze, w odniesieniu do osób o stosunkowo wysokim poziomie funkcjonowania poznawczego. Na takie wyniki może wpływać wspomniany już wcześniej efekt sufitowy. Odnosi się on do sytuacji, gdy wyniki badania osiągną maksymalny możliwy wynik, a dalsza poprawa staje się niemożliwa lub bardzo trudna do zaobserwowania. w kontekście stymulacji tDCS efekt sufitowy może być szczególnie istotny. Jeśli badani już na początku badania osiągną wysoki poziom funkcjonowania, może to ograniczać możliwość zaobserwowania dalszej znaczącej poprawy.

Kolejną kwestią może być oczekiwanie większej skuteczności tDCS podczas zadań wymagających wyższego zaangażowania funkcji wykonawczych i tych, które w większym stopniu angażują korę przedczołową. Dotychczasowe metaanalizy nie dostarczają jednoznacznych danych w tym zakresie (Andryszak i in., 2012; Habich i in., 2021).

4.3. Wielkość zmiany w pamięci operacyjnej a wielkość zmian w innych procesach funkcji wykonawczych

Ośrodkowy układ nerwowy jest dynamicznym układem, który można porównać do sieci naczyń połączonych. Na poziomie neuronalnym, procesy pamięci operacyjnej są koordynowane przez sieć neuronalną, zwłaszcza w obszarze czołowo-ciemieniowym mózgu. w ramach tej sieci grzbietowo-boczna kora przedczołowa (DLPFC) odgrywa istotną rolę (Smith i Jonides, 1998). w przeprowadzonym badaniu właśnie ten obszar był poddawany stymulacji anodowej, czyli pobudzającej. Wcześniejsze badania przy montażu stymulacji, jak w niniejszym badaniu, wykazały poprawę w zakresie procesów pamięci operacyjnej (Cunillera i in., 2014; Fregni i in., 2005a), ale również obserwowano poprawę innych procesów funkcji wykonawczych, m.in. dotyczącą kontroli działania (Habich i in., 2021; Leshikar i in., 2017).

W badaniu własnym założono, że poprawa w zakresie pamięci operacyjnej będzie związana z wielkością poprawy w innych badanych procesach funkcji wykonawczych. Zgodnie z teoretycznymi modelami funkcji wykonawczych, jak i bazując na neurofizjologicznym podłożu funkcjonowania pamięci operacyjnej i innych procesów funkcji wykonawczych, można wyciągnąć wnioski, że poprawa w zakresie pamięci operacyjnej jest związana z poprawą w innych procesach. Pamięć operacyjna i inne funkcje wykonawcze korzystają z podobnych sieci neuronalnych i regionów mózgu, takich jak przednia część korowa zakrętu obręczy i zakręt czołowy dolny. Stymulacja tDCS wpływa na aktywność neuronalną w tych obszarach mózgu, co może wpływać na funkcjonowanie zarówno pamięci operacyjnej, jak i innych funkcji wykonawczych. Jeśli stymulacja tDCS skutecznie ulepsza działanie tych obszarów, można przypuszczać, że poprawa w jednym obszarze będzie miała skutki dla innych. Co więcej, opierając się na mechanizmie transferu poznawczego, który w ogólnym ujęciu zakłada przeniesienie wprawy z wykonania jednego zadania na wykonanie innego (Taatzgen, 2013), można podejrzewać, że osoby, które osiągnęły większą poprawę w pamięci operacyjnej, również uzyskały większą poprawę w innych procesach funkcji wykonawczych. Mechanizm transferu możliwy jest dzięki funkcjonalnemu nakładaniu się procesów (*functional overlap, process overlap*) (Stine-Morrow i Basak, 2011; Taatzgen, 2013; Zajac-Lamparska i Trempała, 2016). Możliwość transferu poprawy oraz jej zakres są wyjaśniane przez stopień nakładania się sieci neuronalnych zaangażowanych w stymulowane procesy poznawcze oraz tych, w których oczekuje się transferu (Dahlin i in., 2008). Rezultaty otrzymane z przeprowadzonego badania wykazały, że w grupie eksperymentalnej zmiany w obrębie pamięci operacyjnej są powiązane w nieznaczny sposób ze zmianami w zakresie procesu pobudzania, czyli zaobserwowano transfer bliski poprawy w zakresie pamięci operacyjnej na proces pobudzania. Warto zauważyć, że zaobserwowanie tych powiązań może być trudniejsze u młodych, zdrowych osób, które wykazują wysoką sprawność procesów poznawczych.

4.4. Płeć a badane zmienne

Niektóre badania dotyczące funkcjonowania neuropoznawczego wskazują, że istnieją istotne różnice między płciami w zakresie funkcji wykonawczych. Ważną zmienną wpływającą na interpretację potencjalnych różnic między płciami są różne trajektorie rozwojowe (Grissom i Reyes, 2019). Badania sugerują, że różnice w rozwoju mózgu, gospodarce hormonalnej i innych czynnikach mogą wpływać na funkcje wykonawcze w różnych etapach życia i mogą prowadzić do różnic między płciami. Badania dotyczące szybkości reakcji wskazują, że czas

reakcji mężczyzn jest krótszy niż czas reakcji kobiet (Gaillard i in., 2021; Tascón i in., 2021). Badania fMRI, w których analizowano aktywność neuronalną pamięci operacyjnej dowiodły, że w przeciwieństwie do kobiet mężczyźni wykazują aktywację prawopółkulową lub obustronną, podczas gdy kobiety wykazują wyraźniejszą aktywację lewopółkulową (Goldstein i in., 2005). Inne badania, w których badani wykonywali zadania n-back w wersji werbalnej ujawniły, że w trakcie tego zadania mężczyźni wykazywali znacznie silniejszą aktywację w prawej półkuli niż kobiety, a kobiety wykazywały znacznie silniejszą aktywację w lewej półkuli (Bell i in., 2006). Badania, w których sprawdzano skuteczność stymulacji tDCS w odniesieniu do pamięci operacyjnej wykazały że w sytuacji silnego obciążenia pamięci operacyjnej, mężczyźni odnoszą korzyści ze stymulacji lewego obszaru DLPFC, podczas gdy kobiety odnoszą większe korzyści ze stymulacji prawego obszaru DLPFC (Meiron i Lavidor, 2013). Te wyniki sugerują istnienie różnic we wzorcach aktywacji mózgu w odpowiedzi na wyzwania poznawcze. Przeprowadzone badanie własne nie potwierdziło takiej zależności. z wykonanych analiz wynika, że płeć nie różnicuje zmian w funkcjach wykonawczych po przeprowadzonej stymulacji. Wynik ten sugeruje, że wpływ stymulacji na funkcje wykonawcze nie jest zależny od płci i nie różnicuje efektów stymulacji w badanej grupie. Należy podkreślić, że różnice między płciami w zakresie funkcji wykonawczych, które są obserwowane w innych badaniach, mogą być związane z różnymi czynnikami biologicznymi, takimi jak różnice w strukturze mózgu, gospodarka hormonalna oraz czynnikami społecznymi, takimi jak tradycyjne role płciowe czy oczekiwania społeczne, które w badaniu własnym nie były kontrolowane.

4.5. Ograniczenia badań własnych

Przeprowadzone badanie nie było wolne od ograniczeń wynikających z zastosowanych narzędzi badawczych, metod statystycznych, doboru grupy badanej oraz procedury badania. Poniżej przedstawiono najważniejsze z nich wraz z potencjalnymi wskazówkami dla przyszłych badań w tym obszarze.

Po pierwsze, wykonano dwa pomiary funkcjonowania poznawczego: przed przystąpieniem do stymulacji oraz po zakończonym cyklu. Dodanie pomiaru w trzecim punkcie czasowym, np. trzy miesiące po zakończeniu stymulacji pozwoliłoby ocenić trwałość uzyskanych efektów w dłuższej perspektywie czasu. Warto uwzględnić to w przyszłych

badaniach. To ważne dla oceny skuteczności tDCS jako terapii oraz dla lepszego zrozumienia potencjalnych długoterminowych korzyści i ewentualnych efektów ubocznych. Dotychczas większość badań z wykorzystaniem tDCS nie kontroluje długotrwałych efektów stymulacji, w szczególności w grupach osób zdrowych.

Jako kolejne ograniczenie można wymienić zastosowanie jednego montażu stymulacji. Być może włączenie do badań grupy, która otrzymywałaby stymulację w montażu: anoda w punkcie F4, a katoda Fp1 ujawniłoby inne efekty stymulacji. Zwiększyłyby to możliwości analizy uzyskanych danych w odniesieniu do fizjologicznych uwarunkowań procesów funkcji wykonawczych. Tak przeprowadzone badanie mogłoby posłużyć do badania subtelnych różnic w funkcjonalnej asymetrii półkulowej. Ponadto analizując wcześniejsze doniesienie w zakresie wykorzystania tDCS obserwowano niespójności w badaniach. Różnice w badanych populacjach, w wielkości elektrod, natężeniu prądu, czasie trwania interwencji, protokołach badania, montażu elektrod oraz czasie i metodach badania – wszystkie mogą przyczynić się do powstania niespójności (Sarkis i in., 2014; Zaehle i in., 2011). Podejścia obliczeniowe wykazały, że rozmiar, lokalizacja i kształt elektrody mogą wpływać na pole elektromagnetyczne w leżących pod nią warstwach mózgu (Zaehle i in., 2011). Badania wykazały, że użycie 25 cm² lub mniejszych elektrod anodowych w anodowej stymulacji tDCS może znacząco poprawić procesy funkcji wykonawczych. z kolei elektroda anodowa o powierzchni 35 cm² nie miała takiego wpływu (Javadi i Walsh, 2012). Stymulacja wykonywana za pomocą mniejszych elektrod jest bardziej precyzyjna i skoncentrowana, podczas gdy większa elektroda jest bardziej skłonna do oddziaływania na inne obszary niż docelowe obszary mózgu, które otaczają miejsce docelowe (Imburgio i Orr, 2018). Manipulacja tymi zmiennymi pozwoliłaby wyciągnąć szersze wnioski.

Zapewne, aby dokładniej zbadać trwałość efektów tDCS na funkcjonowanie poznawcze, konieczne są projekty eksperymentalne uwzględniające indywidualne czynniki, które decydują o skuteczności i mechanizmie działania tDCS o różnej intensywności (Pope i in., 2015). Interesujące może być np. uwzględnienie w dalszych badaniach czynników związanych z chronotypem osób badanych i godzinami stymulacji (poranne vs wieczorne).

Niezwykle pożądanym byłoby przeprowadzenie badania z wykorzystaniem technik neuroobrazowania, np. elektroencefalografii (EEG). Zastosowanie pomiaru aktywności elektrycznej mózgu przed cyklem stymulacji tDCS i po jej zakończeniu oraz analiza danych w ilościowej elektroencefalografii (*quantitative electroencephalogram*; qEEG) pozwoliłyby na

uzyskanie szczegółowych informacji na temat zmian w funkcjonowaniu mózgu, m.in. w zakresie wzorców aktywności w różnych obszarach mózgu, efektywności komunikacji między jego poszczególnymi rejonami, stabilności i równowagi tej aktywności, a także odchyień od normy. Analiza qEEG umożliwiłaby ocenę neurofizjologicznych wskaźników procesów funkcji wykonawczych oraz ich porównanie ze wskaźnikami behawioralnymi. Wcześniejsze badania wykazały, że efekt tDCS zależy od wyjściowego stanu elektrofizjologicznego przed interwencją. Zauważono również, że tDCS prowadzi do większej modulacji fizjologii i zachowania u osób z wyjściowymi sygnaturami fizjologicznymi wskazującymi na mniej adaptacyjne przetwarzanie, ponieważ pozwalają one na większy zakres modulacji (Abul Hasan i in., 2023; Dubreuil-Vall i in., 2019; Z. Wang i in., 2022).

Wspomniane ograniczenia implikują potrzebę dalszych badań w celu potwierdzenia i rozszerzenia wniosków płynących z badania własnego. Badania z większą liczbą uczestników, dłuższym okresem obserwacji, porównanie wyników między różnymi grupami wiekowymi i schorzeniami neuropsychiatrycznymi oraz uwzględnienie wskaźników neurofizjologicznych mogą dostarczyć bardziej kompleksowych i uogólnionych wniosków.

4.6. Implikacje praktyczne

Zrozumienie wpływu stymulacji lewego obszaru grzbietowo-bocznej kory przedczołowej na poszczególne domeny funkcji wykonawczych u osób zdrowych może stanowić bazę, która pozwoli wykorzystać w przyszłości stymulację jako metodę leczenia. Istnieją doniesienia naukowe sugerujące, że anodowa stymulacja tego obszaru może być skuteczną metodą leczenia, m.in. zaburzeń depresyjnych, schizofrenii czy wspomagać rehabilitację neuropsychologiczną (Boggio i in., 2008; Brunelin i in., 2012; Brunoni i in., 2011; Fregni i in., 2006). w badaniach osób z zaburzeniami depresyjnymi i schizofrenią stwierdza się deficyty funkcji wykonawczych, które są związane z nieprawidłową aktywnością grzbietowo-bocznej kory przedczołowej (Fossati i in., 2002; Imburgio i Orr, 2018; Minzenberg i in., 2009). Co więcej, leczeniu skutkującemu redukcją objawów często towarzyszy poprawa funkcji wykonawczych (Biringer i in., 2005; Walter i in., 2010). w związku z tym można podejrzewać, że stymulacja obszaru grzbietowo-bocznej kory przedczołowej zmniejsza objawy u osób z zaburzeniami depresyjnymi i schizofrenią poprzez poprawę funkcji wykonawczych (Imburgio i Orr, 2018). Zrozumienie mechanizmu stojącego za możliwą poprawą funkcji wykonawczych może pomóc wyjaśnić mechanizm leczenia w tych zaburzeniach.

Niniejsza rozprawa może przyczynić się również do ustalenia optymalnych rekomendacji dotyczących parametrów stymulacji tDCS zarówno w grupie osób zdrowych, jak i grupach klinicznych. Ponadto może stanowić bazę do dalszych badań.

5. Wnioski

1. Przechodząca stymulacja prądem stałym (tDCS) w montażu anoda F3, katoda Fp2, wpływa korzystnie na poprawę w funkcjach wykonawczych u zdrowych osób w okresie wczesnej dorosłości w procesach:

a1. pamięci operacyjnej w zakresie:

- rozpiętości słuchowo-werbalnej i wzrokowo-przestrzennej pamięci operacyjnej; efektywności pracy na materiale wzrokowo-przestrzennym; skuteczności utrzymywania w pamięci zamierzonego planu; zapamiętywania i koordynowania różnych komponentów zadania tak, by osiągnąć efektywne wykonanie procesów podtrzymujących informacje.

a2. pobudzania w zakresie:

- przeszukiwania pola i utrzymania pobudzenia; szybkości motorycznej; czasu. poprawności, skuteczności i efektywności planowania; przerzutności i utrzymywania uwagi na zadaniu; sekwencyjnego przetwarzania informacji;

a3. hamowania w zakresie:

- hamowania motorycznego; szybkości motorycznej odpowiedzi na bodziec nieistotny; zdolności zaprzestania wtórnie automatycznej reakcji;

a4. kontroli działania w zakresie:

- czasu potrzebnego do wykonania zadania o większym stopniu złożoności poznawczej; sztywności myślenia; zmiany nastawienia umysłowego w odpowiedzi na informację zwrotną; myślenia abstrakcyjnego i kategoryzowania; rozwiązywania złożonych problemów; skuteczności utrzymania zaplanowanego działania.

b. Najsilniejsze efekty stymulacji zaobserwowano w zakresie:

Pamięci operacyjnej: najsilniejszy efekt stymulacji widoczny był kolejno w zakresie: utrzymania i manipulacji aktualnie przetwarzanymi informacjami; skutecznego zarządzania informacjami w pamięci operacyjnej i efektywnego podejmowania decyzji w kontekście planowania i przewidywania; zdolności utrzymywania i odtwarzania informacji wzrokowo-przestrzennych; rozpiętości pamięci wzrokowo-przestrzennej i słuchowo-werbalnej.

Procesu pobudzania: najsilniejszy efekt stymulacji widoczny był kolejno w zakresie: przeszukiwania pola wzrokowego i utrzymania pobudzenia; skuteczności

koncentrowania zasobów uwagi na bodźcach istotnych oraz szybkości przetwarzania informacji i skuteczności podejmowania decyzji.

Procesu hamowania najsilniejszy efekt stymulacji widoczny był kolejno w zakresie: hamowania motorycznego i zdolności zaprzestania wtórnie automatycznej reakcji.

Procesu kontroli działania najsilniejszy efekt stymulacji widoczny był kolejno w zakresie: efektywności rozwiązywania zadań problemowych; umiejętności utrzymania instrukcji w pamięci i postępowania zgodnie z przyjętą regułą wykonania zadania; myślenia abstrakcyjnego i kategoryzowania; płynnej kontroli działania.

2. Wykazano, że im niższy poziom wyjściowy badanych funkcji, tym większa uzyskana poprawa po stymulacji. Jednocześnie można mówić tutaj o pewnej tendencji, ponieważ podobny związek, choć słabszy, został zaobserwowany również w grupach kontrolnych.
3. Wykazano, że występują nieliczne związki między wielkością poprawy w pamięci operacyjnej a poprawą uzyskaną w pozostałych składowych funkcji wykonawczych, czyli procesu pobudzania, procesu hamowania oraz procesu kontroli działania.
4. Nie wykazano związku między płcią a wielkością poprawy po stymulacji tDCS w zakresie procesów funkcji wykonawczych: pamięci operacyjnej, procesu pobudzania, procesu hamowania oraz procesu kontroli działania.
5. Stosowanie stymulacji tDCS stanowi skuteczną metodę usprawniania funkcjonowania poznawczego osób zdrowych w okresie wczesnej dorosłości.

Bibliografia

- Abul Hasan, M., Shahid, H., Ahmed Qazi, S., Ejaz, O., Danish Mujib, M., Vuckovic, A. (2023). Underpinning the neurological source of executive function following cross hemispheric tDCS stimulation. *International Journal of Psychophysiology*, 185, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2023.01.004>
- Abundis-Gutiérrez, A., Checa, P., Castellanos, C., Rosario Rueda, M. (2014). Electrophysiological correlates of attention networks in childhood and early adulthood. *Neuropsychologia*, 57, 78–92. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.02.013>
- Alexander, G. E., DeLong, M. R., Strick, P. L. (1986). Parallel Organization of Functionally Segregated Circuits Linking Basal Ganglia and Cortex. *Annual Review of Neuroscience*, 9(1), 357–381. <https://doi.org/10.1146/annurev.ne.09.030186.002041>
- Allen, L., Kelly, B. B. (Red.). (2015). *Transforming the Workforce for Children Birth Through Age 8: a Unifying Foundation* (s. 19401). National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/19401>
- Anastassiou, C. A., Montgomery, S. M., Barahona, M., Buzsaki, G., Koch, C. (2010). The Effect of Spatially Inhomogeneous Extracellular Electric Fields on Neurons. *Journal of Neuroscience*, 30(5), 1925–1936. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3635-09.2010>
- Andryszak, P., Wilkość, M., Izdebski, P. (2012). Review of the Latest Concepts Concerning Cognitive and Executive Functioning. w *Current psychosocial problems in traditional and novel approaches: Effectiveness of functioning and life satisfaction: Effectiveness of functioning and life satisfaction: Resources and limitations. Vol. 2 / ed. By H. Liberska* (s. 13–29). Wydawnictwo Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego.
- Anstey, K. J., Sargent-Cox, K., Garde, E., Cherbuin, N., Butterworth, P. (2014). Cognitive development over 8 years in midlife and its association with cardiovascular risk factors. *Neuropsychology*, 28(4), 653–665. <https://doi.org/10.1037/neu0000044>
- Antal, A., Nitsche, M. A., Kruse, W., Kincses, T. Z., Hoffmann, K.-P., Paulus, W. (2004). Direct Current Stimulation over V5 Enhances Visuomotor Coordination by Improving

- Motion Perception in Humans. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(4), 521–527.
<https://doi.org/10.1162/089892904323057263>
- Au, J., Katz, B., Buschkuehl, M., Bunarjo, K., Senger, T., Zabel, C., Jaeggi, S. M., Jonides, J. (2016a). Enhancing Working Memory Training with Transcranial Direct Current Stimulation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 28(9), 1419–1432.
https://doi.org/10.1162/jocn_a_00979
- Au, J., Katz, B., Buschkuehl, M., Bunarjo, K., Senger, T., Zabel, C., Jaeggi, S. M., Jonides, J. (2016b). Enhancing Working Memory Training with Transcranial Direct Current Stimulation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 28(9), 1419–1432.
https://doi.org/10.1162/jocn_a_00979
- Baddeley, A. (1986). *Working memory* (s. xi, 289–xi, 289). Clarendon Press/Oxford University Press.
- Baddeley, A. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4(11), 417–423. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01538-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01538-2)
- Baddeley, A. (2003). Working memory: Looking back and looking forward. *Nature Reviews Neuroscience*, 4(10), 829–839. <https://doi.org/10.1038/nrn1201>
- Baddeley, A. D. (2002). Is working memory still working? *European Psychologist*, 7(2), 85–97. <https://doi.org/10.1027/1016-9040.7.2.85>
- Baddeley, A. D., Hitch, G. J. (1994). Developments in the concept of working memory. *Neuropsychology*, 8(4), 485–493. <https://doi.org/10.1037/0894-4105.8.4.485>
- Baddeley, A., Hitch, G., Allen, R. (2020). a Multicomponent Model of Working Memory. w R. Logie, V. Camos, N. Cowan (Red.), *Working Memory: The state of the science* (s. 10–43). Oxford University Press.
<https://doi.org/10.1093/oso/9780198842286.003.0002>
- Bagarinao, E., Watanabe, H., Maesawa, S., Kawabata, K., Hara, K., Ohdake, R., Ogura, A., Mori, D., Yoneyama, N., Imai, K., Yokoi, T., Kato, T., Koyama, S., Katsuno, M., Wakabayashi, T., Kuzuya, M., Hoshiyama, M., Isoda, H., Naganawa, S., Sobue, G. (2022). Reserve and Maintenance in the Aging Brain: a Longitudinal Study of Healthy

- Older Adults. *Eneuro*, 9(1), ENEURO.0455-21.2022.
<https://doi.org/10.1523/ENEURO.0455-21.2022>
- Baharlouei, H., Saba, M. A., Shaterzadeh Yazdi, M. J., Jaberzadeh, S. (2020). The effect of transcranial direct current stimulation on balance in healthy young and older adults: a systematic review of the literature. *Neurophysiologie Clinique*, 50(2), 119–131.
<https://doi.org/10.1016/j.neucli.2020.01.006>
- Baker, S. C., Rogers, R. D., Owen, A. M., Frith, C. D., Dolan, R. J., Frackowiak, R. S. J., Robbins, T. W. (1996). Neural systems engaged by planning: a PET study of the Tower of London task. *Neuropsychologia*, 34(6), 515–526.
[https://doi.org/10.1016/0028-3932\(95\)00133-6](https://doi.org/10.1016/0028-3932(95)00133-6)
- Baltes, P. B., Staudinger, U. M., Lindenberger, U. (1999). LIFESPAN PSYCHOLOGY: Theory and Application to Intellectual Functioning. *Annual Review of Psychology*, 50(1), 471–507. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.50.1.471>
- Bar, M. (2003). A Cortical Mechanism for Triggering Top-Down Facilitation in Visual Object Recognition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(4), 600–609.
<https://doi.org/10.1162/089892903321662976>
- Barbey, A. K., Koenigs, M., Grafman, J. (2013). Dorsolateral prefrontal contributions to human working memory. *Cortex*, 49(5), 1195–1205.
<https://doi.org/10.1016/j.cortex.2012.05.022>
- Bartl, G., Allen, P., Sandrini, M. (2023). Left Prefrontal tDCS during Learning Does Not Enhance Subsequent Verbal Episodic Memory in Young Adults: Results from Two Double-Blind and Sham-Controlled Experiments. *Brain Sciences*, 13(2), 241.
<https://doi.org/10.3390/brainsci13020241>
- Bartus, R. T., Levere, T. E. (1977). Frontal decortication in rhesus monkeys: a test of the interference hypothesis. *Brain Research*, 119(1), 233–248.
[https://doi.org/10.1016/0006-8993\(77\)90103-2](https://doi.org/10.1016/0006-8993(77)90103-2)
- Başar, E., Düzgün, A. (2016). How is the brain working? *International Journal of Psychophysiology*, 103, 3–11. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2015.02.007>

- Bassett, H. H., Denham, S., Wyatt, T. M., Warren-Khot, H. K. (2012). Refining the Preschool Self-regulation Assessment for Use in Preschool Classrooms: Refining the PSRA. *Infant and Child Development*, 21(6), 596–616. <https://doi.org/10.1002/icd.1763>
- Batty, G. D., Deary, I. J., Gottfredson, L. S. (2007). Premorbid (early life) IQ and Later Mortality Risk: Systematic Review. *Annals of Epidemiology*, 17(4), 278–288. <https://doi.org/10.1016/j.annepidem.2006.07.010>
- Bee, H., Wojciechowski, A., Brzezińska, A. (2004). *Psychologia rozwoju człowieka*. Zysk i S-ka Wydaw.
- Bell, E. C., Willson, M. C., Wilman, A. H., Dave, S., Silverstone, P. H. (2006). Males and females differ in brain activation during cognitive tasks. *NeuroImage*, 30(2), 529–538. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.09.049>
- Berch, D. B., Krikorian, R., Huha, E. M. (1998). The Corsi Block-Tapping Task: Methodological and Theoretical Considerations. *Brain and Cognition*, 38(3), 317–338. <https://doi.org/10.1006/brcg.1998.1039>
- Berg, E. A. (1948). a Simple Objective Technique for Measuring Flexibility in Thinking. *The Journal of General Psychology*, 39(1), 15–22. <https://doi.org/10.1080/00221309.1948.9918159>
- Berryhill, M. E., Jones, K. T. (2012). TDCS selectively improves working memory in older adults with more education. *Neuroscience Letters*, 521(2), 148–151. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2012.05.074>
- Best, J. R., Miller, P. H. (2010). a Developmental Perspective on Executive Function: Development of Executive Functions. *Child Development*, 81(6), 1641–1660. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2010.01499.x>
- Bielecka-Pikul, M. (2011). Wczesne dzieciństwo. w J. Trempała (Red.), *Psychologia rozwoju człowieka* (s. 172–201). PWN.
- Bindman, L. J., Lippold, O. C. J., Redfearn, J. W. T. (1964). The action of brief polarizing currents on the cerebral cortex of the rat (1) during current flow and (2) in the

- production of long-lasting after-effects. *The Journal of Physiology*, 172(3), 369–382. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1964.sp007425>
- Biou, E., Cassouesalle, H., Cogné, M., Sibon, I., De Gabory, I., Dehail, P., Aupy, J., Glize, B. (2019). Transcranial direct current stimulation in post-stroke aphasia rehabilitation: a systematic review. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 62(2), 104–121. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2019.01.003>
- Biringer, E., Lundervold, A., Stordal, K., Mykletun, A., Egeland, J., Bottlender, R., Lund, A. (2005). Executive function improvement upon remission of recurrent unipolar depression. *European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience*, 255(6), 373–380. <https://doi.org/10.1007/s00406-005-0577-7>
- Bledowski, C., Kaiser, J., Rahm, B. (2010). Basic operations in working memory: Contributions from functional imaging studies. *Behavioural Brain Research*, 214(2), 172–179. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2010.05.041>
- Boehringer, A., Macher, K., Dukart, J., Villringer, A., Pleger, B. (2013). Cerebellar Transcranial Direct Current Stimulation Modulates Verbal Working Memory. *Brain Stimulation*, 6(4), 649–653. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2012.10.001>
- Boen, R., Ferschmann, L., Vijayakumar, N., Overbye, K., Fjell, A. M., Espeseth, T., Tamnes, C. K. (2021). Development of attention networks from childhood to young adulthood: a study of performance, intraindividual variability and cortical thickness. *Cortex*, 138, 138–151. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2021.01.018>
- Bogaard, A. R., Lajoie, G., Boyd, H., Morse, A., Zanos, S., Fetz, E. E. (2019). *Cortical network mechanisms of anodal and cathodal transcranial direct current stimulation in awake primates* [Preprint]. Neuroscience. <https://doi.org/10.1101/516260>
- Boggio, P. S., Sultani, N., Fecteau, S., Merabet, L., Mecca, T., Pascual-Leone, A., Basaglia, A., Fregni, F. (2008). Prefrontal cortex modulation using transcranial DC stimulation reduces alcohol craving: a double-blind, sham-controlled study. *Drug and Alcohol Dependence*, 92(1–3), 55–60. <https://doi.org/10.1016/j.drugalcdep.2007.06.011>
- Boudewyn, M. A., Scangos, K., Ranganath, C., Carter, C. S. (2020). Using prefrontal transcranial direct current stimulation (tDCS) to enhance proactive cognitive control in

- schizophrenia. *Neuropsychopharmacology*, 45(11), 1877–1883.
<https://doi.org/10.1038/s41386-020-0750-8>
- Bowman, C. R., Zeithamova, D. (2018). Abstract Memory Representations in the Ventromedial Prefrontal Cortex and Hippocampus Support Concept Generalization. *The Journal of Neuroscience*, 38(10), 2605–2614.
<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2811-17.2018>
- Brasil-Neto, J. P. (2012). Learning, Memory, and Transcranial Direct Current Stimulation. *Frontiers in Psychiatry*, 3. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2012.00080>
- Braunewell, K.-H., Manahan-Vaughan, D. (2001). Long-Term Depression: a Cellular Basis for Learning? *Reviews in the Neurosciences*, 12(2).
<https://doi.org/10.1515/REVNEURO.2001.12.2.121>
- Brunelin, J., Mondino, M., Gassab, L., Haesebaert, F., Gaha, L., Suaud-Chagny, M.-F., Saoud, M., Mechri, A., Poulet, E. (2012). Examining Transcranial Direct-Current Stimulation (tDCS) as a Treatment for Hallucinations in Schizophrenia. *American Journal of Psychiatry*, 169(7), 719–724.
<https://doi.org/10.1176/appi.ajp.2012.11071091>
- Brunetti, R., Del Gatto, C., Delogu, F. (2014). eCorsi: Implementation and testing of the Corsi block-tapping task for digital tablets. *Frontiers in Psychology*, 5.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00939>
- Brunoni, A., Nitsche, M., Loo, C. (Ed.). (2016). *Transcranial Direct Current Stimulation in Neuropsychiatric Disorders*. Springer International Publishing.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-33967-2>
- Brunoni, A. R., Ferrucci, R., Bortolomasi, M., Vergari, M., Tadini, L., Boggio, P. S., Giacomuzzi, M., Barbieri, S., Priori, A. (2011). Transcranial direct current stimulation (tDCS) in unipolar vs. Bipolar depressive disorder. *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, 35(1), 96–101.
<https://doi.org/10.1016/j.pnpbp.2010.09.010>
- Brunoni, A. R., Nitsche, M. A., Bolognini, N., Bikson, M., Wagner, T., Merabet, L., Edwards, D. J., Valero-Cabre, A., Rotenberg, A., Pascual-Leone, A., Ferrucci, R., Priori, A.,

- Boggio, P. S., Fregni, F. (2012). Clinical research with transcranial direct current stimulation (tDCS): Challenges and future directions. *Brain Stimulation*, 5(3), 175–195. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2011.03.002>
- Brunoni, A. R., Vanderhasselt, M.-A. (2014). Working memory improvement with non-invasive brain stimulation of the dorsolateral prefrontal cortex: a systematic review and meta-analysis. *Brain and Cognition*, 86, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2014.01.008>
- Brzezińska, A., Ziółkowska, B., Appelt, K. (2015). *Psychologia rozwoju człowieka*. GWP.
- Brzeziński, J., Wechsler, D. (2011). *Skala Inteligencji D. Wechslera dla dorosłych: Wersja zrewidowana - renormalizacja WAIS-R (PL) : podręcznik*. Pracownia Testów Psychologicznych.
- Budson, A. E., Price, B. H. (2005). Memory Dysfunction. *New England Journal of Medicine*, 352(7), 692–699. <https://doi.org/10.1056/NEJMra041071>
- Budzisz, J. (2017). Przewodząca stymulacja stałoprądowa tDCS w badaniach naukowych mózgu człowieka. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, 1(4), 44–47. <https://doi.org/10.15199/48.2017.04.11>
- Bühler, C. (1933). *Der menschliche Lebenslauf als psychologisches Problem*. Hirzel.
- Buzsáki, G., Draguhn, A. (2004). Neuronal Oscillations in Cortical Networks. *Science*, 304(5679), 1926–1929. <https://doi.org/10.1126/science.1099745>
- Carlson, S. M. (2005). Developmentally Sensitive Measures of Executive Function in Preschool Children. *Developmental Neuropsychology*, 28(2), 595–616. https://doi.org/10.1207/s15326942dn2802_3
- Cazalis, F., Feydy, A., Valabrègue, R., Péligrini-Issac, M., Pierot, L., Azouvi, P. (2006). FMRI study of problem-solving after severe traumatic brain injury. *Brain Injury*, 20(10), 1019–1028. <https://doi.org/10.1080/02699050600664384>
- Cazalis, F., Valabrègue, R., Péligrini-Issac, M., Asloun, S., Robbins, T. W., Granon, S. (2003). Individual differences in prefrontal cortical activation on the Tower of London planning task: Implication for effortful processing: Prefrontal cortex activation and

- cognitive effort. *European Journal of Neuroscience*, 17(10), 2219–2225.
<https://doi.org/10.1046/j.1460-9568.2003.02633.x>
- Cerruti, C., Schlaug, G. (2009). Anodal Transcranial Direct Current Stimulation of the Prefrontal Cortex Enhances Complex Verbal Associative Thought. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21(10), 1980–1987. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.21143>
- Chan, M. M. Y., Yau, S. S. Y., Han, Y. M. Y. (2021). The neurobiology of prefrontal transcranial direct current stimulation (tDCS) in promoting brain plasticity: a systematic review and meta-analyses of human and rodent studies. *Neuroscience Biobehavioral Reviews*, 125, 392–416.
<https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.02.035>
- Changeux, J.-P., Dehaene, S. (1989). Neuronal models of cognitive functions. *Cognition*, 33(1–2), 63–109. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(89\)90006-1](https://doi.org/10.1016/0010-0277(89)90006-1)
- Chen, X. (2022). Effectiveness of cognitive stimulation therapy (CST) on cognition, quality of life and neuropsychiatric symptoms for patients living with dementia: a meta-analysis. *Geriatric Nursing*, 47, 201–210.
<https://doi.org/10.1016/j.gerinurse.2022.07.012>
- Cherney, L. R., Babbitt, E. M., Wang, X., Pitts, L. L. (2021). Extended fMRI-Guided Anodal and Cathodal Transcranial Direct Current Stimulation Targeting Perilesional Areas in Post-Stroke Aphasia: a Pilot Randomized Clinical Trial. *Brain Sciences*, 11(3), 306.
<https://doi.org/10.3390/brainsci11030306>
- Choudhury, N., Gorman, K. S. (2000). The relationship between sustained attention and cognitive performance in 17-24-month old toddlers. *Infant and Child Development*, 9(3), 127–146. [https://doi.org/10.1002/1522-7219\(200009\)9:3<127::AID-ICD225>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/1522-7219(200009)9:3<127::AID-ICD225>3.0.CO;2-5)
- Claessen, M. H. G., van der Ham, I. J. M., van Zandvoort, M. J. E. (2015). Computerization of the Standard Corsi Block-Tapping Task Affects Its Underlying Cognitive Concepts: a Pilot Study. *Applied Neuropsychology: Adult*, 22(3), 180–188.
<https://doi.org/10.1080/23279095.2014.892488>

- Coffman, B. A., Clark, V. P., Parasuraman, R. (2014). Battery powered thought: Enhancement of attention, learning, and memory in healthy adults using transcranial direct current stimulation. *NeuroImage*, 85, 895–908.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.07.083>
- Collingridge, G. L., Bliss, T. V. P. (1987). NMDA receptors—Their role in long-term potentiation. *Trends in Neurosciences*, 10(7), 288–293. [https://doi.org/10.1016/0166-2236\(87\)90175-5](https://doi.org/10.1016/0166-2236(87)90175-5)
- Connor, S. A., Wang, Y. T. (2016). a Place at the Table: LTD as a Mediator of Memory Genesis. *The Neuroscientist*, 22(4), 359–371.
<https://doi.org/10.1177/1073858415588498>
- Corsi, P. M. (1972). *Human memory and the medial temporal region of the brain*. McGill University.
- Coulborn, S., Fernández-Espejo, D. (2022). Prefrontal tDCS is unable to modulate mind wandering propensity or underlying functional or effective brain connectivity. *Scientific Reports*, 12(1), 18021. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22893-8>
- Couperus, J. W. (2011). Perceptual load influences selective attention across development. *Developmental Psychology*, 47(5), 1431–1439. <https://doi.org/10.1037/a0024027>
- Cuevas, K., Bell, M. A. (2014). Infant Attention and Early Childhood Executive Function. *Child Development*, 85(2), 397–404. <https://doi.org/10.1111/cdev.12126>
- Cunillera, T., Fuentemilla, L., Brignani, D., Cucurell, D., Miniussi, C. (2014). a Simultaneous Modulation of Reactive and Proactive Inhibition Processes by Anodal tDCS on the Right Inferior Frontal Cortex. *PLoS ONE*, 9(11), e113537.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113537>
- Cunningham, W. R., Birren, J. E. (1980). Age Changes in the Factor Structure of Intellectual Abilities in Adulthood and Old Age. *Educational and Psychological Measurement*, 40(2), 271–290. <https://doi.org/10.1177/001316448004000201>

- Dagher, A., Owen, A. M., Boecker, H., Brooks, D. J. (1999). Mapping the network for planning: a correlational PET activation study with the Tower of London task. *Brain*, *122*(10), 1973–1987. <https://doi.org/10.1093/brain/122.10.1973>
- Dahlin, E., Neely, A. S., Larsson, A., Bäckman, L., Nyberg, L. (2008). Transfer of Learning After Updating Training Mediated by the Striatum. *Science*, *320*(5882), 1510–1512. <https://doi.org/10.1126/science.1155466>
- Darkow, R., Martin, A., Würtz, A., Flöel, A., Meinzer, M. (2017). Transcranial direct current stimulation effects on neural processing in post-stroke aphasia. *Human Brain Mapping*, *38*(3), 1518–1531. <https://doi.org/10.1002/hbm.23469>
- DaSilva, A. F., Volz, M. S., Bikson, M., Fregni, F. (2011). Electrode Positioning and Montage in Transcranial Direct Current Stimulation. *Journal of Visualized Experiments*, *51*, 2744. <https://doi.org/10.3791/2744>
- Davidson, M. C., Amso, D., Anderson, L. C., Diamond, A. (2006). Development of cognitive control and executive functions from 4 to 13 years: Evidence from manipulations of memory, inhibition, and task switching. *Neuropsychologia*, *44*(11), 2037–2078. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.02.006>
- Dayan, E., Censor, N., Buch, E. R., Sandrini, M., Cohen, L. G. (2013). Noninvasive brain stimulation: From physiology to network dynamics and back. *Nature Neuroscience*, *16*(7), 838–844. <https://doi.org/10.1038/nn.3422>
- Dedoncker, J., Brunoni, A. R., Baeken, C., Vanderhasselt, M.-A. (2016). a Systematic Review and Meta-Analysis of the Effects of Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS) Over the Dorsolateral Prefrontal Cortex in Healthy and Neuropsychiatric Samples: Influence of Stimulation Parameters. *Brain Stimulation*, *9*(4), 501–517. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.04.006>
- D’Esposito, M., Cooney, J. W., Gazzaley, A., Gibbs, S. E. B., Postle, B. R. (2006). Is the Prefrontal Cortex Necessary for Delay Task Performance? Evidence from Lesion and fMRI Data. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *12*(2), 248–260. <https://doi.org/10.1017/S1355617706060322>

- Dockery, C. A., Hueckel-Weng, R., Birbaumer, N., Plewnia, C. (2009). Enhancement of Planning Ability by Transcranial Direct Current Stimulation. *The Journal of Neuroscience*, 29(22), 7271–7277. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0065-09.2009>
- Domańska, Ł., Borkowska, A. (2011). *Podstawy neuropsychologii klinicznej*. Wydawnictwo Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej.
- Draganski, B., May, A. (2008). Training-induced structural changes in the adult human brain. *Behavioural Brain Research*, 192(1), 137–142. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2008.02.015>
- Dubljević, V., Saigle, V., Racine, E. (2014). The Rising Tide of tDCS in the Media and Academic Literature. *Neuron*, 82(4), 731–736. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2014.05.003>
- Dubljević, V., Venero, C., Knafo, S. (2015). What is Cognitive Enhancement? w *Cognitive Enhancement* (s. 1–9). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417042-1.00001-2>
- Dubreuil-Vall, L., Chau, P., Ruffini, G., Widge, A. S., Camprodon, J. A. (2019). TDCS to the left DLPFC modulates cognitive and physiological correlates of executive function in a state-dependent manner. *Brain Stimulation*, 12(6), 1456–1463. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2019.06.006>
- Dumontheil, I. (2016). Adolescent brain development. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 10, 39–44. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.04.012>
- Eavani, H., Habes, M., Satterthwaite, T. D., An, Y., Hsieh, M.-K., Honnorat, N., Erus, G., Doshi, J., Ferrucci, L., Beason-Held, L. L., Resnick, S. M., Davatzikos, C. (2018). Heterogeneity of structural and functional imaging patterns of advanced brain aging revealed via machine learning methods. *Neurobiology of Aging*, 71, 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2018.06.013>
- Eggermont, J. J. (2021). *Brain oscillations, synchrony, and plasticity: Basic principles and application to auditory-related disorders*. Academic Press, an imprint of Elsevier.

- Engel, A. K., Fries, P., Singer, W. (2001). Dynamic predictions: Oscillations and synchrony in top-down processing. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(10), 704–716.
<https://doi.org/10.1038/35094565>
- Engle, R. W. (2002). Working Memory Capacity as Executive Attention. *Current Directions in Psychological Science*, 11(1), 19–23. <https://doi.org/10.1111/1467-8721.00160>
- Engle, R. W., Kane, M. J. (2003). Executive Attention, Working Memory Capacity, and a Two-Factor Theory of Cognitive Control. w *Psychology of Learning and Motivation* (T. 44, s. 145–199). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(03\)44005-X](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(03)44005-X)
- Evans, C., Zich, C., Lee, J. S. A., Ward, N., Bestmann, S. (2022). Inter-individual variability in current direction for common tDCS montages. *NeuroImage*, 260, 119501.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2022.119501>
- Fan, J., McCandliss, B. D., Sommer, T., Raz, A., Posner, M. I. (2002). Testing the Efficiency and Independence of Attentional Networks. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(3), 340–347. <https://doi.org/10.1162/089892902317361886>
- Feil, S., Eisenhut, P., Strakeljahn, F., Müller, S., Nauer, C., Bansi, J., Weber, S., Liebs, A., Lefaucheur, J.-P., Kesselring, J., Gonzenbach, R., Mylius, V. (2019). Left Shifting of Language Related Activity Induced by Bihemispheric tDCS in Postacute Aphasia Following Stroke. *Frontiers in Neuroscience*, 13, 295.
<https://doi.org/10.3389/fnins.2019.00295>
- Ferguson, H. J., Brunson, V. E. A., Bradford, E. E. F. (2021). The developmental trajectories of executive function from adolescence to old age. *Scientific Reports*, 11(1), 1382.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-80866-1>
- Fertonani, A., Rosini, S., Cotelli, M., Rossini, P. M., Miniussi, C. (2010). Naming facilitation induced by transcranial direct current stimulation. *Behavioural Brain Research*, 208(2), 311–318. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2009.10.030>
- Figeys, M., Zeeman, M., Kim, E. S. (2021). Effects of Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS) on Cognitive Performance and Cerebral Oxygen Hemodynamics: a Systematic Review. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15, 623315.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.623315>

- Filmer, H. L., Dux, P. E., Mattingley, J. B. (2014). Applications of transcranial direct current stimulation for understanding brain function. *Trends in Neurosciences*, 37(12), 742–753. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2014.08.003>
- Fiori, V., Nitsche, M. A., Cucuzza, G., Caltagirone, C., Marangolo, P. (2019). High-Definition Transcranial Direct Current Stimulation Improves Verb Recovery in Aphasic Patients Depending on Current Intensity. *Neuroscience*, 406, 159–166. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2019.03.010>
- Fiske, A., Holmboe, K. (2019). Neural substrates of early executive function development. *Developmental Review: DR*, 52, 42–62. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2019.100866>
- Flöel, A. (2014). TDCS-enhanced motor and cognitive function in neurological diseases. *NeuroImage*, 85, 934–947. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.05.098>
- Flöel, A., Rösser, N., Michka, O., Knecht, S., Breitenstein, C. (2008). Noninvasive Brain Stimulation Improves Language Learning. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(8), 1415–1422. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20098>
- Formisano, M. A., Caivan, M., Oliva, M. (2022). Cognitive processes and neuroscientific epistemology. *Addaiyan Journal of Arts, Humanities and Social Sciences*, 14–26. <https://doi.org/10.36099/ajahss.4.2.2>
- Fossati, P., Ergis, A. M., Allilaire, J. F. (2002). [Executive functioning in unipolar depression: a review]. *L'Encephale*, 28(2), 97–107.
- Framorando, D., Cai, T., Wang, Y., Pegna, A. J. (2021). Effects of Transcranial Direct Current Stimulation on effort during a working-memory task. *Scientific Reports*, 11(1), 16399. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95639-7>
- Frank, J. A., Antonini, M.-J., Anikeeva, P. (2019). Next-generation interfaces for studying neural function. *Nature Biotechnology*, 37(9), 1013–1023. <https://doi.org/10.1038/s41587-019-0198-8>
- Fregni, F., Boggio, P. S., Nitsche, M. A., Marcolin, M. A., Rigonatti, S. P., Pascual-Leone, A. (2006). Treatment of major depression with transcranial direct current stimulation. *Bipolar Disorders*, 8(2), 203–204. <https://doi.org/10.1111/j.1399-5618.2006.00291.x>

- Fregni, F., Boggio, P. S., Nitsche, M., Bermanpohl, F., Antal, A., Feredoes, E., Marcolin, M. A., Rigonatti, S. P., Silva, M. T. A., Paulus, W., Pascual-Leone, A. (2005a). Anodal transcranial direct current stimulation of prefrontal cortex enhances working memory. *Experimental Brain Research*, 166(1), 23–30. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-2334-6>
- Fregni, F., Boggio, P. S., Nitsche, M., Bermanpohl, F., Antal, A., Feredoes, E., Marcolin, M. A., Rigonatti, S. P., Silva, M. T. A., Paulus, W., Pascual-Leone, A. (2005b). Anodal transcranial direct current stimulation of prefrontal cortex enhances working memory. *Experimental Brain Research*, 166(1), 23–30. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-2334-6>
- Fregni, F., Nitsche, M. A., Loo, C. K., Brunoni, A. R., Marangolo, P., Leite, J., Carvalho, S., Bolognini, N., Caumo, W., Paik, N. J., Simis, M., Ueda, K., Ekhtiari, H., Luu, P., Tucker, D. M., Tyler, W. J., Brunelin, J., Datta, A., Juan, C. H., ... Bikson, M. (2015). Regulatory considerations for the clinical and research use of transcranial direct current stimulation (tDCS): Review and recommendations from an expert panel. *Clinical Research and Regulatory Affairs*, 32(1), 22–35. <https://doi.org/10.3109/10601333.2015.980944>
- Friedman, N. P., Miyake, A. (2017). Unity and diversity of executive functions: Individual differences as a window on cognitive structure. *Cortex*, 86, 186–204. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.04.023>
- Friebs, M. A., Frings, C. (2019). Offline beats online: Transcranial direct current stimulation timing influences on working memory. *NeuroReport*, 30(12), 795–799. <https://doi.org/10.1097/WNR.0000000000001272>
- Fritsch, B., Reis, J., Martinowich, K., Schambra, H. M., Ji, Y., Cohen, L. G., Lu, B. (2010). Direct Current Stimulation Promotes BDNF-Dependent Synaptic Plasticity: Potential Implications for Motor Learning. *Neuron*, 66(2), 198–204. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2010.03.035>
- Fusar-Poli, P., Rubia, K., Rossi, G., Sartori, G., Balottin, U. (2012). Striatal Dopamine Transporter Alterations in ADHD: Pathophysiology or Adaptation to

- Psychostimulants? a Meta-Analysis. *American Journal of Psychiatry*, 169(3), 264–272. <https://doi.org/10.1176/appi.ajp.2011.11060940>
- Fuster, J. M. (2001). The Prefrontal Cortex—An Update. *Neuron*, 30(2), 319–333. [https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(01\)00285-9](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(01)00285-9)
- Gaillard, A., Fehring, D. J., Rossell, S. L. (2021). Sex differences in executive control: a systematic review of functional neuroimaging studies. *European Journal of Neuroscience*, 53(8), 2592–2611. <https://doi.org/10.1111/ejn.15107>
- Garon, N., Bryson, S. E., Smith, I. M. (2008). Executive function in preschoolers: a review using an integrative framework. *Psychological Bulletin*, 134(1), 31–60. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.134.1.31>
- Ghanavati, E., Salehinejad, M. A., De Melo, L., Nitsche, M. A., Kuo, M.-F. (2022). NMDA receptor-related mechanisms of dopaminergic modulation of tDCS-induced neuroplasticity. *Cerebral Cortex*, 32(23), 5478–5488. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhac028>
- Gilbert, S. J., Burgess, P. W. (2008). Executive function. *Current Biology*, 18(3), R110–R114. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.12.014>
- Gogtay, N., Giedd, J. N., Lusk, L., Hayashi, K. M., Greenstein, D., Vaituzis, A. C., Nugent, T. F., Herman, D. H., Clasen, L. S., Toga, A. W., Rapoport, J. L., Thompson, P. M. (2004). Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(21), 8174–8179. <https://doi.org/10.1073/pnas.0402680101>
- Golden, C. J. (1979a). *Clinical interpretation of objective psychological tests*. Grune Stratton.
- Golden, C. J. (1979b). *Clinical interpretation of objective psychological tests* (2nd ed). Allyn and Bacon.
- Goldstein, J. M., Jerram, M., Poldrack, R., Anagnoson, R., Breiter, H. C., Makris, N., Goodman, J. M., Tsuang, M. T., Seidman, L. J. (2005). Sex differences in prefrontal cortical brain activity during fMRI of auditory verbal working memory. *Neuropsychology*, 19(4), 509–519. <https://doi.org/10.1037/0894-4105.19.4.509>

- Gomez, P., Ratcliff, R., Perea, M. (2007). a model of the go/no-go task. *Journal of Experimental Psychology: General*, 136(3), 389–413. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.136.3.389>
- Gözenman, F., Berryhill, M. E. (2016). Working memory capacity differentially influences responses to tDCS and HD-tDCS in a retro-cue task. *Neuroscience Letters*, 629, 105–109. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2016.06.056>
- Grissom, N. M., Reyes, T. M. (2019). Let's call the whole thing off: Evaluating gender and sex differences in executive function. *Neuropsychopharmacology*, 44(1), 86–96. <https://doi.org/10.1038/s41386-018-0179-5>
- Gurba, A. (2011). Wczesna dorosłość. w J. Trempała (Red.), *Psychologia rozwoju człowieka* (s. 287–311). PWN.
- Habich, A., Fehér, K. D., Harty, S., Vanderhasselt, M.-A., Brem, A.-K. (2021). Modulating Cognition in Healthy Young Adults with tDCS. w A. R. Brunoni, M. A. Nitsche, C. K. Loo (Red.), *Transcranial Direct Current Stimulation in Neuropsychiatric Disorders* (s. 329–411). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76136-3_17
- Hannah, R., Iacovou, A., Rothwell, J. C. (2019). Direction of TDCS current flow in human sensorimotor cortex influences behavioural learning. *Brain Stimulation*, 12(3), 684–692. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2019.01.016>
- Hauser, T. U., Rotzer, S., Grabner, R. H., Mérillat, S., Jäncke, L. (2013). Enhancing performance in numerical magnitude processing and mental arithmetic using transcranial Direct Current Stimulation (tDCS). *Frontiers in Human Neuroscience*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00244>
- Hebb, D. O. (2005). *The Organization of Behavior* (0 wyd.). Psychology Press. <https://doi.org/10.4324/9781410612403>
- Heinze, K., Ruh, N., Nitschke, K., Reis, J., Fritsch, B., Unterrainer, J. M., Rahm, B., Weiller, C., Kaller, C. P. (2014). Transcranial direct current stimulation over left and right DLPFC: Lateralized effects on planning performance and related eye movements.

Biological Psychology, 102, 130–140.

<https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2014.07.019>

Hensch, T. K. (2005). Critical period plasticity in local cortical circuits. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(11), 877–888. <https://doi.org/10.1038/nrn1787>

Herzyk, A. (2015). *Wprowadzenie do neuropsychologii klinicznej*. Wydawnictwo Naukowe „Scholar”.

Hill, A. T., Fitzgerald, P. B., Hoy, K. E. (2016). Effects of Anodal Transcranial Direct Current Stimulation on Working Memory: a Systematic Review and Meta-Analysis of Findings From Healthy and Neuropsychiatric Populations. *Brain Stimulation*, 9(2), 197–208. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2015.10.006>

Holmboe, K., Larkman, C., de Klerk, C., Simpson, A., Bell, M. A., Patton, L., Christodoulou, C., Dvergsdal, H. (2021). The early childhood inhibitory touchscreen task: a new measure of response inhibition in toddlerhood and across the lifespan. *PLOS ONE*, 16(12), e0260695. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260695>

Hornowska, E. (2004). *Skale Inteligencji dla Dorosłych Davida Wechslera WAIS-R oraz WAIS-III*. Wydawnictwo Naukowe „Scholar”.

Hoy, K. E., Emonson, M. R. L., Arnold, S. L., Thomson, R. H., Daskalakis, Z. J., Fitzgerald, P. B. (2013). Testing the limits: Investigating the effect of tDCS dose on working memory enhancement in healthy controls. *Neuropsychologia*, 51(9), 1777–1784. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.05.018>

Huizinga, M., Dolan, C. V., van der Molen, M. W. (2006). Age-related change in executive function: Developmental trends and a latent variable analysis. *Neuropsychologia*, 44(11), 2017–2036. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.01.010>

Hutson, T. H., Di Giovanni, S. (2019). The translational landscape in spinal cord injury: Focus on neuroplasticity and regeneration. *Nature Reviews Neurology*, 15(12), 732–745. <https://doi.org/10.1038/s41582-019-0280-3>

Hyde, J., Carr, H., Kelley, N., Seneviratne, R., Reed, C., Parlatini, V., Garner, M., Solmi, M., Rosson, S., Cortese, S., Brandt, V. (2022). Efficacy of neurostimulation across mental

- disorders: Systematic review and meta-analysis of 208 randomized controlled trials. *Molecular Psychiatry*, 27(6), 2709–2719. <https://doi.org/10.1038/s41380-022-01524-8>
- Imburgio, M. J., Orr, J. M. (2018). Effects of prefrontal tDCS on executive function: Methodological considerations revealed by meta-analysis. *Neuropsychologia*, 117, 156–166. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.04.022>
- Ito, M. (1989). Long-Term Depression. *Annual Review of Neuroscience*, 12(1), 85–102. <https://doi.org/10.1146/annurev.ne.12.030189.000505>
- Iyer, M. B., Mattu, U., Grafman, J., Lomarev, M., Sato, S., Wassermann, E. M. (2005). Safety and cognitive effect of frontal DC brain polarization in healthy individuals. *Neurology*, 64(5), 872–875. <https://doi.org/10.1212/01.WNL.0000152986.07469.E9>
- Jagodzińska, M. (2012). *Psychologia pamięci. Badania, teorie, zastosowania*. Sensus.
- Jang, S., Choi, J., Kim, K., Jun, S. (2019). Brain activity changes induced by tDCS. *Brain Stimulation*, 12(2), 484. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2018.12.581>
- Jaśkowski, P. (2009). *Neuronauka poznawcza: Jak mózg tworzy umysł*. Vizja Press It.
- Javadi, A. H., Cheng, P. (2013). Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS) Enhances Reconsolidation of Long-Term Memory. *Brain Stimulation*, 6(4), 668–674. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2012.10.007>
- Javadi, A. H., Walsh, V. (2012). Transcranial direct current stimulation (tDCS) of the left dorsolateral prefrontal cortex modulates declarative memory. *Brain Stimulation*, 5(3), 231–241. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2011.06.007>
- Jeon, S. Y., Han, S. J. (2012). Improvement of the Working Memory and Naming by Transcranial Direct Current Stimulation. *Annals of Rehabilitation Medicine*, 36(5), 585. <https://doi.org/10.5535/arm.2012.36.5.585>
- Jiang, J., Truong, D. Q., Esmailpour, Z., Huang, Y., Badran, B. W., Bikson, M. (2020). Enhanced tES and tDCS computational models by meninges emulation. *Journal of Neural Engineering*, 17(1), 016027. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ab549d>

- Jodzio, K. (2006). Neuropoznawcze mechanizmy funkcjonowania pamięci operacyjnej. *Kolokwia Psychologiczne*, 14, 25–42.
- Jodzio, K. (2008). *Neuropsychologia intencjonalnego działania. Koncepcje funkcji wykonawczych*. Scholar.
- Jodzio, K. (2017). *Neuropsychologia intencjonalnego działania: Koncepcje funkcji wykonawczych* (Wyd. 1, dodruk). Wydawnictwo Naukowe Scholar.
- Jones, K. T., Peterson, D. J., Blacker, K. J., Berryhill, M. E. (2017). Frontoparietal neurostimulation modulates working memory training benefits and oscillatory synchronization. *Brain Research*, 1667, 28–40.
<https://doi.org/10.1016/j.brainres.2017.05.005>
- Kaczmarek, B. L. J., Markiewicz, K. (2021). Brain Plasticity and the Idea of the Functional System. *Lurian Journal*, 2(2), 46–62. <https://doi.org/10.15826/Lurian.2021.2.2.3>
- Kane, M. J., Poole, B. J., Tuholski, S. W., Engle, R. W. (2006). Working memory capacity and the top-down control of visual search: Exploring the boundaries of „executive attention”. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 32(4), 749–777. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.32.4.749>
- Karthikeyan, R., Smoot, M. R., Mehta, R. K. (2021). Anodal tDCS augments and preserves working memory beyond time-on-task deficits. *Scientific Reports*, 11(1), 19134.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-98636-y>
- Ke, Y., Wang, N., Du, J., Kong, L., Liu, S., Xu, M., An, X., Ming, D. (2019). The Effects of Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS) on Working Memory Training in Healthy Young Adults. *Frontiers in Human Neuroscience*, 13, 19.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00019>
- Keeser, D., Padberg, F., Reisinger, E., Pogarell, O., Kirsch, V., Palm, U., Karch, S., Möller, H.-J., Nitsche, M. A., Mulert, C. (2011). Prefrontal direct current stimulation modulates resting EEG and event-related potentials in healthy subjects: a standardized low resolution tomography (sLORETA) study. *NeuroImage*, 55(2), 644–657.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.12.004>

- Kekic, M., Boysen, E., Campbell, I. C., Schmidt, U. (2016). a systematic review of the clinical efficacy of transcranial direct current stimulation (tDCS) in psychiatric disorders. *Journal of Psychiatric Research*, 74, 70–86.
<https://doi.org/10.1016/j.jpsychires.2015.12.018>
- Kellaway, P. (1946). The part played by electric fish in the early history of bioelectricity and electrotherapy. *Bulletin of the History of Medicine*, 20(2), 112–137.
- Kessler, S. K., Turkeltaub, P. E., Benson, J. G., Hamilton, R. H. (2012). Differences in the experience of active and sham transcranial direct current stimulation. *Brain Stimulation*, 5(2), 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2011.02.007>
- Kielar-Turska, M. (2011). Średnie dzieciństwo—Wiek przedszkolny. w J. Trempała (Red.), *Psychologia rozwoju człowieka* (s. 202–233). PWN.
- Kim, J.-H., Kim, D.-W., Chang, W. H., Kim, Y.-H., Kim, K., Im, C.-H. (2014). Inconsistent outcomes of transcranial direct current stimulation may originate from anatomical differences among individuals: Electric field simulation using individual MRI data. *Neuroscience Letters*, 564, 6–10. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2014.01.054>
- Knight, R. T., Richard Staines, W., Swick, D., Chao, L. L. (1999). Prefrontal cortex regulates inhibition and excitation in distributed neural networks. *Acta Psychologica*, 101(2–3), 159–178. [https://doi.org/10.1016/S0001-6918\(99\)00004-9](https://doi.org/10.1016/S0001-6918(99)00004-9)
- Knight, R. T., Scabini, D., Woods, D. L. (1989). Prefrontal cortex gating of auditory transmission in humans. *Brain Research*, 504(2), 338–342.
[https://doi.org/10.1016/0006-8993\(89\)91381-4](https://doi.org/10.1016/0006-8993(89)91381-4)
- Kolb, B., Whishaw, I. Q. (2003). *Fundamentals of human neuropsychology* (5th ed). Worth Publishers.
- Kołodziejczyk, A. (2011). Późne dzieciństwo—Wczesny wiek szkolny. w J. Trempała (Red.), *Psychologia rozwoju człowieka* (s. 234–258). PWN.
- Kontrymowicz-Ogińska, H. (2011). *Chronotyp: Aspekty behawioralne, korelaty osobowościowe, konsekwencje zdrowotne*. Księgarnia Akademicka.
<https://books.google.pl/books?id=1FQqmAEACAAJ>

- Kosno, M., Byczewska-Konieczny, K. (2015). Studia nad rozwojem funkcji zarządzających w średnim dzieciństwie i w wieku senioralnym. w D. Kubicka (Red.), *Nowe perspektywy badań rozwoju w dzieciństwie i dorosłości: Księga pamiątkowa dla Profesor Marii Kielar-Turskiej* (s. 63–83). Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego.
- Kossut, M. (2019). Basic mechanism of neuroplasticity. *Neuropsychiatria i Neuropsychologia*, 14(1–2), 1–8. <https://doi.org/10.5114/nan.2019.87727>
- Kotapka-Minc, S. (2007). Znaczenie badania neuropsychologicznego w diagnostyce otępienia. *Polski Przegląd Neurologiczny*, 3(2), 61–68.
- Krathwohl, D. R. (1984). Experimental desings. w *Encyclopedia of psychology* (T. 2, s. 466–470). John Wiley Sons.
- Krause, B., Cohen Kadosh, R. (2014). Not all brains are created equal: The relevance of individual differences in responsiveness to transcranial electrical stimulation. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2014.00025>
- Kronberg, G., Bridi, M., Abel, T., Bikson, M., Parra, L. C. (2017). Direct Current Stimulation Modulates LTP and LTD: Activity Dependence and Dendritic Effects. *Brain Stimulation*, 10(1), 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.10.001>
- Kropotov, J. D. (2006). Trancranial Direct Current Stimulation (tDCS) a new old tool in neurotherapy. *COST B27 and SAN*, 16–18.
- Kropotov, J. D. (2009a). Introduction. w *Quantitative EEG, Event-Related Potentials and Neurotherapy* (s. 385–392). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374512-5.50039-5>
- Kropotov, J. D. (2009b). *Quantitative EEG, event-related potentials and neurotherapy* (1st ed). Elsevier/Academic.
- Kropotov, J. D. (2016). *Functional neuromarkers for psychiatry: Applications for diagnosis and treatment*. Elsevier Science.
- Kropotov, J. D., Ponomarev, V. A., Hollup, S., Mueller, A. (2011). Dissociating action inhibition, conflict monitoring and sensory mismatch into independent components of

- event related potentials in GO/NOGO task. *NeuroImage*, 57(2), 565–575.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.04.060>
- Kropotov, J., Mueller, A. (2012). Neurophysiological basis of microgenesis theory: Stages of visual information flow as reflected in functionally defined components of event related potentials in man. *The Official Journal of the Polish Neuropsychological Society*, 10(1), 25–33. <https://doi.org/10.5604/17307503.995083>
- Kucharska-Pietura, K., Wilkos, E., Sławińska, K. (2012). Diagnoza neuropsychologiczna w praktyce psychiatrycznej. *Psychiatria po dyplomie*, 9(3), 52–57.
- Kukuła, D., Wiłkość-Dębczyńska, M., Michalska, P., Ołownia, K. (2020). Przechczaszkowa stymulacja prądem stałym (tDCS) u pacjentów z afazją po udarze mózgu. *Medycyna Ogólna i Nauki o Zdrowiu*, T. 26(nr 2), s. 118-123.
<https://doi.org/10.26444/monz/119489>
- Kuo, M.-F., Mosayebi, M., Jamil, A., Nitsche, M. A. (2018). S181. Optimizing the neuroplastic effects of cathodal transcranial direct current stimulation (tDCS) over the primary motor cortex. *Clinical Neurophysiology*, 129, e209.
<https://doi.org/10.1016/j.clinph.2018.04.541>
- Kurcz, I. (1995). *Pamięć, uczenie się, język*. PWN.
- Laakso, I., Tanaka, S., Koyama, S., De Santis, V., Hirata, A. (2015). Inter-subject Variability in Electric Fields of Motor Cortical tDCS. *Brain Stimulation*, 8(5), 906–913.
<https://doi.org/10.1016/j.brs.2015.05.002>
- Lazeron, R. H., Rombouts, S. A., Scheltens, P., Polman, C. H., Barkhof, F. (2004). An fMRI study of planning-related brain activity in patients with moderately advanced multiple sclerosis. *Multiple Sclerosis Journal*, 10(5), 549–555.
<https://doi.org/10.1191/1352458504ms1072oa>
- Lebel, C., Walker, L., Leemans, A., Phillips, L., Beaulieu, C. (2008). Microstructural maturation of the human brain from childhood to adulthood. *NeuroImage*, 40(3), 1044–1055. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.12.053>

- Lee, H. W., Lo, Y.-H., Li, K.-H., Sung, W.-S., Juan, C.-H. (2015). The relationship between the development of response inhibition and intelligence in preschool children. *Frontiers in Psychology, 6*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00802>
- Lefaucheur, J.-P., Antal, A., Ayache, S. S., Benninger, D. H., Brunelin, J., Cogiamanian, F., Cotelli, M., De Ridder, D., Ferrucci, R., Langguth, B., Marangolo, P., Mylius, V., Nitsche, M. A., Padberg, F., Palm, U., Poulet, E., Priori, A., Rossi, S., Schecklmann, M., ... Paulus, W. (2017). Evidence-based guidelines on the therapeutic use of transcranial direct current stimulation (tDCS). *Clinical Neurophysiology, 128*(1), 56–92. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2016.10.087>
- Leite, J., Carvalho, S., Fregni, F., Boggio, P. S., Gonçalves, Ó. F. (2013). The Effects of Cross-Hemispheric Dorsolateral Prefrontal Cortex Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS) on Task Switching. *Brain Stimulation, 6*(4), 660–667. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2012.10.006>
- Leshikar, E. D., Leach, R. C., McCurdy, M. P., Trumbo, M. C., Sklenar, A. M., Frankenstein, A. N., Matzen, L. E. (2017). Transcranial direct current stimulation of dorsolateral prefrontal cortex during encoding improves recall but not recognition memory. *Neuropsychologia, 106*, 390–397. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2017.10.022>
- Lezak, M. D. (Red.). (2012). *Neuropsychological assessment* (5th ed). Oxford University Press.
- Lezak, M. D., Lezak, M. D. (Red.). (2004). *Neuropsychological assessment* (4th ed). Oxford University Press.
- Lindenberger, U., Lövdén, M. (2019). Brain Plasticity in Human Lifespan Development: The Exploration–Selection–Refinement Model. *Annual Review of Developmental Psychology, 1*(1), 197–222. <https://doi.org/10.1146/annurev-devpsych-121318-085229>
- Lindsay, G. W. (2020). Attention in Psychology, Neuroscience, and Machine Learning. *Frontiers in Computational Neuroscience, 14*, 29. <https://doi.org/10.3389/fncom.2020.00029>

- Liston, C., Kagan, J. (2002). Memory enhancement in early childhood. *Nature*, 419(6910), 896–896. <https://doi.org/10.1038/419896a>
- Liu, A., Vöröslakos, M., Kronberg, G., Henin, S., Krause, M. R., Huang, Y., Opitz, A., Mehta, A., Pack, C. C., Krekelberg, B., Berényi, A., Parra, L. C., Melloni, L., Devinsky, O., Buzsáki, G. (2018). Immediate neurophysiological effects of transcranial electrical stimulation. *Nature Communications*, 9(1), 5092. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07233-7>
- Longstaff, A. (2006). *Krótkie wykłady. Neurobiologia*. PWN.
- Lövdén, M., Fratiglioni, L., Glymour, M. M., Lindenberger, U., Tucker-Drob, E. M. (2020). Education and Cognitive Functioning Across the Life Span. *Psychological Science in the Public Interest*, 21(1), 6–41. <https://doi.org/10.1177/1529100620920576>
- Luque-Casado, A., Fogelson, N., Iglesias-Soler, E., Fernandez-del-Olmo, M. (2019). Exploring the effects of Transcranial Direct Current Stimulation over the prefrontal cortex on working memory: a cluster analysis approach. *Behavioural Brain Research*, 375, 112144. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2019.112144>
- Luria, A. R. (1970). The Functional Organization of the Brain. *Scientific American*, 222(3), 66–78. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0370-66>
- Łojek, E., Stańczak, J. (2012). *Kolorowy test połączeń wersja dla dorosłych CTT: Polska normalizacja : podręcznik*. Pracownia Testów Psychologicznych Polskiego Towarzystwa Psychologicznego.
- Łuria, A. R. (1967). *Zaburzenia wyższych czynności korowych wskutek ogniskowych uszkodzeń mózgu: Wprowadzenie do neuropsychologii* (M. Klimkowski, B. Baranowski, Z. Doroszowa, Tłum.). PWN. <https://books.google.pl/books?id=gqNLYAAACAAJ>
- Maheux-Caron, V., Trémolière, B., Lepage, J.-F., Blanchette, I. (2021). Transcranial direct current stimulation of the left dorsolateral prefrontal cortex can reduce the detrimental effect of stress on working memory. *Psychology Neuroscience*, 14(1), 73–81. <https://doi.org/10.1037/pne0000206>

- Malinow, R., Malenka, R. C. (2002). AMPA Receptor Trafficking and Synaptic Plasticity. *Annual Review of Neuroscience*, 25(1), 103–126.
<https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.25.112701.142758>
- Marangolo, P., Fiori, V., Calpagnano, M. A., Campana, S., Razzano, C., Caltagirone, C., Marini, A. (2013). TDCS over the left inferior frontal cortex improves speech production in aphasia. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00539>
- Marshall, L., Helgadóttir, H., Mölle, M., Born, J. (2006). Boosting slow oscillations during sleep potentiates memory. *Nature*, 444(7119), 610–613.
<https://doi.org/10.1038/nature05278>
- Martin, L., Jaime, K., Ramos, F., Robles, F. (2021). Declarative working memory: a bio-inspired cognitive architecture proposal. *Cognitive Systems Research*, 66, 30–45.
<https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2020.10.014>
- Maruszewski, T. (1996). *Psychologia poznawcza*. Polskie Towarzystwo Semiotyczne.
- Meinzer, M., Lindenberg, R., Antonenko, D., Fleisch, T., Floel, A. (2013). Anodal Transcranial Direct Current Stimulation Temporarily Reverses Age-Associated Cognitive Decline and Functional Brain Activity Changes. *Journal of Neuroscience*, 33(30), 12470–12478. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5743-12.2013>
- Meiron, O., Lavidor, M. (2013). Unilateral Prefrontal Direct Current Stimulation Effects are Modulated by Working Memory Load and Gender. *Brain Stimulation*, 6(3), 440–447.
<https://doi.org/10.1016/j.brs.2012.05.014>
- Merenstein, J. L., Bennett, I. J. (2022). Bridging patterns of neurocognitive aging across the older adult lifespan. *Neuroscience Biobehavioral Reviews*, 135, 104594.
<https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2022.104594>
- Mesulam, M.-M. (Red.). (2000). *Principles of behavioral and cognitive neurology* (2nd ed). Oxford University Press.

- Miller, E. K., Cohen, J. D. (2001). An Integrative Theory of Prefrontal Cortex Function. *Annual Review of Neuroscience*, 24(1), 167–202.
<https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.24.1.167>
- Miller, G. A., Galanter, E., Pribram, K. H. (1960). *Plans and the structure of behavior*. Henry Holt and Co. <https://doi.org/10.1037/10039-000>
- Minati, L., Campanhã, C., Critchley, H. D., Boggio, P. S. (2012). Effects of transcranial direct-current stimulation (tDCS) of the dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC) during a mixed-gambling risky decision-making task. *Cognitive Neuroscience*, 3(2), 80–88.
<https://doi.org/10.1080/17588928.2011.628382>
- Minzenberg, M. J., Laird, A. R., Thelen, S., Carter, C. S., Glahn, D. C. (2009). Meta-analysis of 41 Functional Neuroimaging Studies of Executive Function in Schizophrenia. *Archives of General Psychiatry*, 66(8), 811.
<https://doi.org/10.1001/archgenpsychiatry.2009.91>
- Mirski, A., Paçhalska, M., Moskała, M., Orski, M., Orska, M., Miąskiewicz, M., Zapała, J., Kropotov, J. (2015). Neuromarkers of anxiety and depression in a patient after neuro-ophthalmic surgery of the meningioma – effect of individually-tailored tDCS and neurofeedback. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 22(4), 718–723.
<https://doi.org/10.5604/12321966.1185783>
- Mohammadi, A. (2016). Induction of Neuroplasticity by Transcranial Direct Current Stimulation. *Journal of Biomedical Physics Engineering*, 6(4), 205–208.
- Mole, C., Henry, A. (2022). What is attention? Adverbialist theories. *WIREs Cognitive Science*. <https://doi.org/10.1002/wcs.1588>
- Monti, A., Cogiamanian, F., Marceglia, S., Ferrucci, R., Mameli, F., Mrakic-Sposta, S., Vergari, M., Zago, S., Priori, A. (2008). Improved naming after transcranial direct current stimulation in aphasia. *Journal of Neurology, Neurosurgery Psychiatry*, 79(4), 451–453. <https://doi.org/10.1136/jnnp.2007.135277>
- Morris, R. G., Ahmed, S., Syed, G. M., Toone, B. K. (1993). Neural correlates of planning ability: Frontal lobe activation during the tower of London test. *Neuropsychologia*, 31(12), 1367–1378. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(93\)90104-8](https://doi.org/10.1016/0028-3932(93)90104-8)

- Mostofsky, S. H., Schafer, J. G. B., Abrams, M. T., Goldberg, M. C., Flower, A. A., Boyce, A., Courtney, S. M., Calhoun, V. D., Kraut, M. A., Denckla, M. B., Pekar, J. J. (2003). FMRI evidence that the neural basis of response inhibition is task-dependent. *Cognitive Brain Research*, *17*(2), 419–430. [https://doi.org/10.1016/S0926-6410\(03\)00144-7](https://doi.org/10.1016/S0926-6410(03)00144-7)
- Mueller, S. T., Piper, B. J. (2014). The Psychology Experiment Building Language (PEBL) and PEBL Test Battery. *Journal of Neuroscience Methods*, *222*, 250–259. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2013.10.024>
- Negash, S., Xie, S., Davatzikos, C., Clark, C. M., Trojanowski, J. Q., Shaw, L. M., Wolk, D. A., Arnold, S. E. (2013). Cognitive and functional resilience despite molecular evidence of Alzheimer’s disease pathology. *Alzheimer’s Dementia*, *9*(3), e89–e95. <https://doi.org/10.1016/j.jalz.2012.01.009>
- Nejati, V., Salehinejad, M. A., Nitsche, M. A. (2018). Interaction of the Left Dorsolateral Prefrontal Cortex (l-DLPFC) and Right Orbitofrontal Cortex (OFC) in Hot and Cold Executive Functions: Evidence from Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS). *Neuroscience*, *369*, 109–123. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2017.10.042>
- Nelson, R. E., Dickson, A. L., Baños, J. H. (2000). An Automated Administration of Corsi’s Block-Tapping Test. *Perceptual and Motor Skills*, *91*(2), 578–580. <https://doi.org/10.2466/pms.2000.91.2.578>
- Nęcka, E., Orzechowski, J., Szymura, B., Wichary, S. (2020). *Psychologia poznawcza* (Wydanie drugie). Wydawnictwo Naukowe PWN SA.
- Nęcka, E., Szymura, B., Orzechowski, J. (2013). *Psychologia poznawcza*. PWN.
- Nitsche, M. A., Boggio, P. S., Fregni, F., Pascual-Leone, A. (2009). Treatment of depression with transcranial direct current stimulation (tDCS): a Review. *Experimental Neurology*, *219*(1), 14–19. <https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2009.03.038>
- Nitsche, M. A., Cohen, L. G., Wassermann, E. M., Priori, A., Lang, N., Antal, A., Paulus, W., Hummel, F., Boggio, P. S., Fregni, F., Pascual-Leone, A. (2008). Transcranial direct current stimulation: State of the art 2008. *Brain Stimulation*, *1*(3), 206–223. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2008.06.004>

- Nitsche, M. A., Fricke, K., Henschke, U., Schlitterlau, A., Liebetanz, D., Lang, N., Henning, S., Tergau, F., Paulus, W. (2003). Pharmacological Modulation of Cortical Excitability Shifts Induced by Transcranial Direct Current Stimulation in Humans. *The Journal of Physiology*, 553(1), 293–301. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2003.049916>
- Nitsche, M. A., Paulus, W. (2000). Excitability changes induced in the human motor cortex by weak transcranial direct current stimulation. *The Journal of Physiology*, 527(3), 633–639. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2000.t01-1-00633.x>
- Oberauer, K. (2005). The measurement of working memory capacity. w O. Wilhelm R. W. Engle (Red.), *Handbook of Understanding and Measuring Intelligence* (s. 393–408). SAGE Publications, Inc.
- Ohn, S. H., Park, C.-I., Yoo, W.-K., Ko, M.-H., Choi, K. P., Kim, G.-M., Lee, Y. T., Kim, Y.-H. (2008). Time-dependent effect of transcranial direct current stimulation on the enhancement of working memory. *NeuroReport*, 19(1), 43–47. <https://doi.org/10.1097/WNR.0b013e3282f2adfd>
- Olejniak, M. (2011). Średnia dorosłość. w J. Trempała (Red.), *Psychologia rozwoju człowieka* (s. 312–325). PWN.
- Olesen, P. J., Westerberg, H., Klingberg, T. (2004). Increased prefrontal and parietal activity after training of working memory. *Nature Neuroscience*, 7(1), 75–79. <https://doi.org/10.1038/nn1165>
- Oleszkowicz, A., Senejko, A. (2011). Dorastanie. w J. Trempała (Red.), *Psychologia rozwoju człowieka* (s. 259–286). PWN.
- Opitz, A., Paulus, W., Will, S., Antunes, A., Thielscher, A. (2015). Determinants of the electric field during transcranial direct current stimulation. *NeuroImage*, 109, 140–150. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.01.033>
- Ormezowska, E., Zawirski, M., Jaskólski, D. (2012). Koncepcja dynamicznej lokalizacji funkcji w rehabilitacji afatycznych zaburzeń mowy. *Aktualności Neurologiczne*, 12, 215–221.

- Orzechowski, J. (2012). *Magiczna liczba jeden: Czyli co jeszcze zmieści się w pamięci roboczej*. Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego.
- Owen, A. M. (1997). Cognitive planning in humans: Neuropsychological, neuroanatomical and neuropharmacological perspectives. *Progress in Neurobiology*, 53(4), 431–450. [https://doi.org/10.1016/S0301-0082\(97\)00042-7](https://doi.org/10.1016/S0301-0082(97)00042-7)
- Owen, A. M., Doyon, J., Petrides, M., Evans, A. C. (1996). Planning and Spatial Working Memory: a Positron Emission Tomography Study in Humans. *European Journal of Neuroscience*, 8(2), 353–364. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.1996.tb01219.x>
- Paolo, A. (1995). Construct validity of the WCST in normal elderly and persons with Parkinson's disease. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 10(5), 463–473. [https://doi.org/10.1016/0887-6177\(95\)00052-6](https://doi.org/10.1016/0887-6177(95)00052-6)
- Parasuraman, R. (Red.). (1998). *The attentive brain*. MIT Press.
- Parent, A. (2004). Giovanni Aldini: From Animal Electricity to Human Brain Stimulation. *Canadian Journal of Neurological Sciences / Journal Canadien Des Sciences Neurologiques*, 31(4), 576–584. <https://doi.org/10.1017/S0317167100003851>
- Pąchalska, M. (2009). *Rehabilitacja neuropsychologiczna: Procesy poznawcze i emocjonalne*. Wydawnictwo Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej.
- Pąchalska, M., Kaczmarek, B. L. J., Bednarek, S. (2021). *Neuropsychologia tożsamości* (Wydanie I-1 dodruk). Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Pąchalska, M., Kaczmarek, B. L. J., Kropotov, J. D. (2020). *Neuropsychologia kliniczna: Od teorii do praktyki* (Wydanie I-4 dodruk). Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Pąchalska, M., Kaczmarek, B. L. J., Kropotov, Ū. D., Brown, J. W., Wydawnictwo Naukowe PWN. (2019). *Neuropsychologia kliniczna: Od teorii do praktyki*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Peretti, C.-S., Danion, J.-M., Gierski, F., Grange, D. (2002). Cognitive skill learning and aging a component process analysis. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 17(5), 445–459. <https://doi.org/10.1093/arclin/17.5.445>

- Petersen, S. E., Posner, M. I. (2012). The Attention System of the Human Brain: 20 Years After. *Annual Review of Neuroscience*, 35(1), 73–89. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-062111-150525>
- Phillips, L. H., Wynn, V. E., Gilhooly, K., Della Sala, S., Logie, R. (1999). The Role of Memory in the Tower of London Task. *Memory*, 7(2), 209–231. <https://doi.org/10.1080/741944066>
- Piper, B. J., Li, V., Eiwaz, M. A., Kobel, Y. V., Benice, T. S., Chu, A. M., Olsen, R. H. J., Rice, D. Z., Gray, H. M., Mueller, S. T. (2012). Executive function on the Psychology Experiment Building Language tests. *Behavior Research Methods*, 44(1), 110–123. <https://doi.org/10.3758/s13428-011-0096-6>
- Piper, B. J., Mueller, S. T., Geerken, A. R., Dixon, K. L., Kroliczak, G., Olsen, R. H. J., Miller, J. K. (2015). Reliability and validity of neurobehavioral function on the Psychology Experimental Building Language test battery in young adults. *PeerJ*, 3, e1460. <https://doi.org/10.7717/peerj.1460>
- Polanowska, K., Seniów, J. (2010). Wpływ przezczaszkowej stymulacji prądem stałym na funkcjonowanie poznawcze chorych po uszkodzeniu mózgu. *Neurologia i Neurochirurgia Polska*, 44(6), 580–590. [https://doi.org/10.1016/S0028-3843\(14\)60156-0](https://doi.org/10.1016/S0028-3843(14)60156-0)
- Pope, P. A., Brenton, J. W., Miall, R. C. (2015). Task-Specific Facilitation of Cognition by Anodal Transcranial Direct Current Stimulation of the Prefrontal Cortex. *Cerebral Cortex*, 25(11), 4551–4558. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhv094>
- Posner, M. I., Petersen, S. E. (1990). The Attention System of the Human Brain. *Annual Review of Neuroscience*, 13(1), 25–42. <https://doi.org/10.1146/annurev.ne.13.030190.000325>
- Poulakis, K., Reid, R. I., Przybelski, S. A., Knopman, D. S., Graff-Radford, J., Lowe, V. J., Mielke, M. M., Machulda, M. M., Jack, C. R., Petersen, R. C., Westman, E., Vemuri, P. (2021). Longitudinal deterioration of white-matter integrity: Heterogeneity in the ageing population. *Brain Communications*, 3(1), fcaa238. <https://doi.org/10.1093/braincomms/fcaa238>

- Pozuelos, J. P., Paz-Alonso, P. M., Castillo, A., Fuentes, L. J., Rueda, M. R. (2014). Development of attention networks and their interactions in childhood. *Developmental Psychology*, 50(10), 2405–2415. <https://doi.org/10.1037/a0037469>
- Quiles, V., Ferrero, L., Iáñez, E., Ortiz, M., Azorín, J. M. (2022). Review of tDCS Configurations for Stimulation of the Lower-Limb Area of Motor Cortex and Cerebellum. *Brain Sciences*, 12(2), 248. <https://doi.org/10.3390/brainsci12020248>
- Radman, T., Ramos, R. L., Brumberg, J. C., Bikson, M. (2009). Role of cortical cell type and morphology in subthreshold and suprathreshold uniform electric field stimulation in vitro. *Brain Stimulation*, 2(4), 215-228.e3. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2009.03.007>
- Rahman, A., Lafon, B., Parra, L. C., Bikson, M. (2017). Direct current stimulation boosts synaptic gain and cooperativity in vitro. *The Journal of Physiology*, 595(11), 3535–3547. <https://doi.org/10.1113/JP273005>
- Rainville, C., Amieva, H., Lafont, S., Dartigues, J.-F., Orgogozo, J.-M., Fabrigoule, C. (2002). Executive function deficits in patients with dementia of the Alzheimer's type a study with a Tower of London task. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 17(6), 513–530. <https://doi.org/10.1093/arclin/17.6.513>
- Rasser, P. E., Johnston, P., Lagopoulos, J., Ward, P. B., Schall, U., Thienel, R., Bender, S., Toga, A. W., Thompson, P. M. (2005). Functional MRI BOLD response to Tower of London performance of first-episode schizophrenia patients using cortical pattern matching. *NeuroImage*, 26(3), 941–951. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.11.054>
- Rawji, V., Ciocca, M., Zacharia, A., Soares, D., Truong, D., Bikson, M., Rothwell, J., Bestmann, S. (2018). TDCS changes in motor excitability are specific to orientation of current flow. *Brain Stimulation*, 11(2), 289–298. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2017.11.001>
- Redick, T. S., Lindsey, D. R. B. (2013). Complex span and n-back measures of working memory: a meta-analysis. *Psychonomic Bulletin Review*, 20(6), 1102–1113. <https://doi.org/10.3758/s13423-013-0453-9>

- Reinhart, R. M. G., Cosman, J. D., Fukuda, K., Woodman, G. F. (2017). Using transcranial direct-current stimulation (tDCS) to understand cognitive processing. *Attention, Perception, Psychophysics*, 79(1), 3–23. <https://doi.org/10.3758/s13414-016-1224-2>
- Repovš, G., Baddeley, A. (2006). The multi-component model of working memory: Explorations in experimental cognitive psychology. *Neuroscience*, 139(1), 5–21. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2005.12.061>
- Richmond, L. L., Wolk, D., Chein, J., Olson, I. R. (2014). Transcranial Direct Current Stimulation Enhances Verbal Working Memory Training Performance over Time and Near Transfer Outcomes. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26(11), 2443–2454. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00657
- Riley, M. R., Constantinidis, C. (2016). Role of Prefrontal Persistent Activity in Working Memory. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2015.00181>
- Ripp, I., Emch, M., Wu, Q., Lizarraga, A., Udale, R., Von Bastian, C. C., Koch, K., Yakushev, I. (2022). Adaptive working memory training does not produce transfer effects in cognition and neuroimaging. *Translational Psychiatry*, 12(1), 512. <https://doi.org/10.1038/s41398-022-02272-7>
- Roberts, A. C., Robbins, T. W., Weiskrantz, L. (1998). *The Prefrontal Cortex Executive and Cognitive Functions*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198524410.001.0001>
- Robinson, S. J., Brewer, G. (2016). Performance on the traditional and the touch screen, tablet versions of the Corsi Block and the Tower of Hanoi tasks. *Computers in Human Behavior*, 60, 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.02.047>
- Rose, S. A., Feldman, J. F., Jankowski, J. J. (2001). Visual short-term memory in the first year of life: Capacity and recency effects. *Developmental Psychology*, 37(4), 539–549. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.37.4.539>
- Rowe, J. B., Owen, A. M., Johnsrude, I. S., Passingham, R. E. (2001). Imaging the mental components of a planning task. *Neuropsychologia*, 39(3), 315–327. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(00\)00109-3](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(00)00109-3)

- Roy, L. B., Sparing, R., Fink, G. R., Hesse, M. D. (2015). Modulation of attention functions by anodal tDCS on right PPC. *Neuropsychologia*, 74, 96–107.
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.02.028>
- Royall, D. R., Lauterbach, E. C., Cummings, J. L., Reeve, A., Rummans, T. A., Kaufer, D. I., LaFrance, Jr., W. C., Coffey, C. E. (2002). Executive Control Function: a Review of Its Promise and Challenges for Clinical Research. a Report From the Committee on Research of the American Neuropsychiatric Association. *The Journal of Neuropsychiatry and Clinical Neurosciences*, 14(4), 377–405.
<https://doi.org/10.1176/jnp.14.4.377>
- Rudroff, T., Workman, C. D. (2021). Transcranial Direct Current Stimulation as a Treatment Tool for Mild Traumatic Brain Injury. *Brain Sciences*, 11(6), 806.
<https://doi.org/10.3390/brainsci11060806>
- Rueda, M. R., Checa, P., Cómbita, L. M. (2012). Enhanced efficiency of the executive attention network after training in preschool children: Immediate changes and effects after two months. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2, S192–S204.
<https://doi.org/10.1016/j.dcn.2011.09.004>
- Ruf, S. P., Fallgatter, A. J., Plewnia, C. (2017). Augmentation of working memory training by transcranial direct current stimulation (tDCS). *Scientific Reports*, 7(1), 876.
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-01055-1>
- Sacco, K., Galetto, V., Dimitri, D., Geda, E., Perotti, F., Zettin, M., Geminiani, G. C. (2016). Concomitant Use of Transcranial Direct Current Stimulation and Computer-Assisted Training for the Rehabilitation of Attention in Traumatic Brain Injured Patients: Behavioral and Neuroimaging Results. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 10.
<https://doi.org/10.3389/fnbeh.2016.00057>
- Samani, M. M., Agboada, D., Jamil, A., Kuo, M., Nitsche, M. (2019). Cathodal Transcranial Direct Current Stimulation over the Primary Motor Cortex Induces Nonlinear Neuroplasticity with Modulations of Intensity and Duration. *Brain Stimulation*, 12(2), 405. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2018.12.309>

- Sarkis, R. A., Kaur, N., Camprodon, J. A. (2014). Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS): Modulation of Executive Function in Health and Disease. *Current Behavioral Neuroscience Reports*, 1(2), 74–85. <https://doi.org/10.1007/s40473-014-0009-y>
- Sarmiento, C. I., San-Juan, D., Prasath, V. B. S. (2016). Letter to the Editor: Brief history of transcranial direct current stimulation (tDCS): from electric fishes to microcontrollers. *Psychological Medicine*, 46(15), 3259–3261. <https://doi.org/10.1017/S0033291716001926>
- Sawyer, S. M., Azzopardi, P. S., Wickremarathne, D., Patton, G. C. (2018). The age of adolescence. *The Lancet Child Adolescent Health*, 2(3), 223–228. [https://doi.org/10.1016/S2352-4642\(18\)30022-1](https://doi.org/10.1016/S2352-4642(18)30022-1)
- Schaefer, S. Y., Hooyman, A., Haikalis, N. K., Essikpe, R., Lohse, K. R., Duff, K., Wang, P. (2022). Efficacy of Corsi Block Tapping Task training for improving visuospatial skills: a non-randomized two-group study. *Experimental Brain Research*, 240(11), 3023–3032. <https://doi.org/10.1007/s00221-022-06478-5>
- Schall, U., Johnston, P., Lagopoulos, J., Jüptner, M., Jentzen, W., Thienel, R., Dittmann-Balçar, A., Bender, S., Ward, P. B. (2003). Functional brain maps of Tower of London performance: a positron emission tomography and functional magnetic resonance imaging study. *NeuroImage*, 20(2), 1154–1161. [https://doi.org/10.1016/S1053-8119\(03\)00338-0](https://doi.org/10.1016/S1053-8119(03)00338-0)
- Schapkin, S. A., Falkenstein, M., Marks, A., Griefahn, B. (2007). Practice-Related Effects in a Go-Nogo Task. *Perceptual and Motor Skills*, 105(3_suppl), 1275–1288. <https://doi.org/10.2466/pms.105.4.1275-1288>
- Schmahmann, J. D., Guell, X., Stoodley, C. J., Halko, M. A. (2019). The Theory and Neuroscience of Cerebellar Cognition. *Annual Review of Neuroscience*, 42(1), 337–364. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-070918-050258>
- Schneider, W., Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention. *Psychological Review*, 84(1), 1–66. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.84.1.1>

- Schroeder, P. A., Plewnia, C. (2017). Beneficial Effects of Cathodal Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS) on Cognitive Performance. *Journal of Cognitive Enhancement, 1*(1), 5–9. <https://doi.org/10.1007/s41465-016-0005-0>
- Schroeder, P. A., Schwippel, T., Wolz, I., Svaldi, J. (2020). Meta-analysis of the effects of transcranial direct current stimulation on inhibitory control. *Brain Stimulation, 13*(5), 1159–1167. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2020.05.006>
- Shallice, T. (1982). Specific impairments of planning. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences, 298*(1089), 199–209. <https://doi.org/10.1098/rstb.1982.0082>
- Shiffrin, R. M., Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending and a general theory. *Psychological Review, 84*(2), 127–190. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.84.2.127>
- Shoda, Y., Wilson, N. L., Whitsett, D. D., Lee-Dussud, J., Zayas, V. (2015). The person as a cognitive-affective processing system: Quantitative ideography as an integral component of cumulative science. w M. Mikulincer, P. R. Shaver, M. L. Cooper, R. J. Larsen (Red.), *APA handbook of personality and social psychology, Volume 4: Personality processes and individual differences*. (s. 491–513). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/14343-022>
- Simmonds, D. J., Pekar, J. J., Mostofsky, S. H. (2008). Meta-analysis of Go/No-go tasks demonstrating that fMRI activation associated with response inhibition is task-dependent. *Neuropsychologia, 46*(1), 224–232. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.07.015>
- Singh, M., Sharma, A. (2015). *Correlation between attention assessment tasks*. 8(2), 172–175. <https://doi.org/10.141079/ijitkm.2015.805>
- Smith, E. E., Jonides, J. (1998). Neuroimaging analyses of human working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 95*(20), 12061–12068. <https://doi.org/10.1073/pnas.95.20.12061>
- Smith, R. (2008). *Cranial Electrotherapy Stimulation: Its First Fifty Years, Plus Three: a Monograph*. Tate Publishing Enterprises.

- Soliman, R. K., Tax, C. M. W., Abo-Elfetoh, N., Karim, A. A., Youssef, A., Kamal, D., Khedr, E. M. (2021). Effects of tDCS on Language Recovery in Post-Stroke Aphasia: a Pilot Study Investigating Clinical Parameters and White Matter Change with Diffusion Imaging. *Brain Sciences*, *11*(10), 1277. <https://doi.org/10.3390/brainsci11101277>
- Sowell, E. R., Peterson, B. S., Thompson, P. M., Welcome, S. E., Henkenius, A. L., Toga, A. W. (2003). Mapping cortical change across the human life span. *Nature Neuroscience*, *6*(3), 309–315. <https://doi.org/10.1038/nn1008>
- Squire, L. R. (2004). Memory systems of the brain: a brief history and current perspective. *Neurobiology of Learning and Memory*, *82*(3), 171–177. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2004.06.005>
- Stagg, C. J., Antal, A., Nitsche, M. A. (2018). Physiology of Transcranial Direct Current Stimulation. *The Journal of ECT*, *34*(3), 144–152. <https://doi.org/10.1097/YCT.0000000000000510>
- Stagg, C. J., Best, J. G., Stephenson, M. C., O’Shea, J., Wylezinska, M., Kincses, Z. T., Morris, P. G., Matthews, P. M., Johansen-Berg, H. (2009). Polarity-Sensitive Modulation of Cortical Neurotransmitters by Transcranial Stimulation. *Journal of Neuroscience*, *29*(16), 5202–5206. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4432-08.2009>
- Stern, Y. (2009). Cognitive reserve☆. *Neuropsychologia*, *47*(10), 2015–2028. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.03.004>
- Stern, Y. (2012). Cognitive reserve in ageing and Alzheimer’s disease. *The Lancet Neurology*, *11*(11), 1006–1012. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(12\)70191-6](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(12)70191-6)
- Stine-Morrow, E. A. L., Basak, C. (2011). Cognitive Interventions. w *Handbook of the Psychology of Aging* (s. 153–171). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-380882-0.00010-3>
- Straś-Romanowska, M. (2011). Późna dorosłość. w J. Trempała (Red.), *Psychologia rozwoju człowieka* (s. 326–350). PWN.

- Strenze, T. (2007). Intelligence and socioeconomic success: a meta-analytic review of longitudinal research. *Intelligence*, 35(5), 401–426.
<https://doi.org/10.1016/j.intell.2006.09.004>
- Stuss, D. T. (2011). Functions of the Frontal Lobes: Relation to Executive Functions. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 17(05), 759–765.
<https://doi.org/10.1017/S1355617711000695>
- Suchy, Y. (2016). *Executive functioning: a comprehensive guide for clinical practice*. Oxford University Press.
- Summers, J. J., Kang, N., Cauraugh, J. H. (2016). Does transcranial direct current stimulation enhance cognitive and motor functions in the ageing brain? a systematic review and meta-analysis. *Ageing Research Reviews*, 25, 42–54.
<https://doi.org/10.1016/j.arr.2015.11.004>
- Szepietowska, E. M. (2019). Rezerwa poznawcza: Jak się starzeć pomyślnie? *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, sectio J – Paedagogia-Psychologia*, 31(3), 299. <https://doi.org/10.17951/j.2018.31.3.299-311>
- Taatgen, N. A. (2013). The nature and transfer of cognitive skills. *Psychological Review*, 120(3), 439–471. <https://doi.org/10.1037/a0033138>
- Takesian, A. E., Hensch, T. K. (2013). Balancing Plasticity/Stability Across Brain Development. w *Progress in Brain Research* (T. 207, s. 3–34). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63327-9.00001-1>
- Takeuchi, H., Taki, Y., Sassa, Y., Hashizume, H., Sekiguchi, A., Fukushima, A., Kawashima, R. (2013). Brain structures associated with executive functions during everyday events in a non-clinical sample. *Brain Structure Function*, 218(4), 1017–1032.
<https://doi.org/10.1007/s00429-012-0444-z>
- Takeuchi, T., Duzkiewicz, A. J., Morris, R. G. M. (2014). The synaptic plasticity and memory hypothesis: Encoding, storage and persistence. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369(1633), 20130288.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0288>

- Talsma, L. J., Kroese, H. A., Slagter, H. A. (2017). Boosting Cognition: Effects of Multiple-Session Transcranial Direct Current Stimulation on Working Memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 29(4), 755–768. https://doi.org/10.1162/jocn_a_01077
- Tascón, L., Di Cicco, C., Piccardi, L., Palmiero, M., Bocchi, A., Cimadevilla, J. M. (2021). Sex Differences in Spatial Memory: Comparison of Three Tasks Using the Same Virtual Context. *Brain Sciences*, 11(6), 757. <https://doi.org/10.3390/brainsci11060757>
- Tau, G. Z., Peterson, B. S. (2010). Normal Development of Brain Circuits. *Neuropsychopharmacology*, 35(1), 147–168. <https://doi.org/10.1038/npp.2009.115>
- Taylor, S. J., Barker, L. A., Heavey, L., McHale, S. (2013). The typical developmental trajectory of social and executive functions in late adolescence and early adulthood. *Developmental Psychology*, 49(7), 1253–1265. <https://doi.org/10.1037/a0029871>
- Teo, F., Hoy, K. E., Daskalakis, Z. J., Fitzgerald, P. B. (2011). Investigating the Role of Current Strength in tDCS Modulation of Working Memory Performance in Healthy Controls. *Frontiers in Psychiatry*, 2. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2011.00045>
- Thair, H., Holloway, A. L., Newport, R., Smith, A. D. (2017). Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS): a Beginner's Guide for Design and Implementation. *Frontiers in Neuroscience*, 11, 641. <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00641>
- Trempała, J. (2001). Dwa przełomy w badaniach nad rozwojem psychicznym człowieka. *Przegląd Psychologiczny*, 44(1), 85–92.
- Truong, D. Q., Bikson, M. (2018). Physics of Transcranial Direct Current Stimulation Devices and Their History. *The Journal of ECT*, 34(3), 137–143. <https://doi.org/10.1097/YCT.0000000000000531>
- Tsujimoto, S. (2008). The Prefrontal Cortex: Functional Neural Development During Early Childhood. *The Neuroscientist*, 14(4), 345–358. <https://doi.org/10.1177/1073858408316002>
- Tulving, E. (1972). Episodic and Semantic Memory. w E. Tulving W. Donaldson (Red.), *Organization of Memory* (s. 381–403). Academic Press.

- Ulam, F., Shelton, C., Richards, L., Davis, L., Hunter, B., Fregni, F., Higgins, K. (2015). Cumulative effects of transcranial direct current stimulation on EEG oscillations and attention/working memory during subacute neurorehabilitation of traumatic brain injury. *Clinical Neurophysiology*, *126*(3), 486–496. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2014.05.015>
- Van Den Heuvel, O. A., Groenewegen, H. J., Barkhof, F., Lazeron, R. H. C., Van Dyck, R., Veltman, D. J. (2003). Frontostriatal system in planning complexity: a parametric functional magnetic resonance version of tower of london task. *NeuroImage*, *18*(2), 367–374. [https://doi.org/10.1016/S1053-8119\(02\)00010-1](https://doi.org/10.1016/S1053-8119(02)00010-1)
- Van Den Heuvel, O. A., Veltman, D. J., Groenewegen, H. J., Cath, D. C., Van Balkom, A. J. L. M., Van Hartkamp, J., Barkhof, F., Van Dyck, R. (2005). Frontal-Striatal Dysfunction During Planning in Obsessive-Compulsive Disorder. *Archives of General Psychiatry*, *62*(3), 301. <https://doi.org/10.1001/archpsyc.62.3.301>
- Vandierendonck, A., Kemps, E., Fastame, M. C., Szmalec, A. (2004). Working memory components of the Corsi blocks task. *British Journal of Psychology*, *95*(1), 57–79. <https://doi.org/10.1348/000712604322779460>
- Vasquez, A., Fregni, F. (2021). Regulatory Aspects. w A. R. Brunoni, M. A. Nitsche, C. K. Loo (Red.), *Transcranial Direct Current Stimulation in Neuropsychiatric Disorders* (s. 757–766). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76136-3_40
- Venkatakrishnan, A., Sandrini, M. (2012). Combining transcranial direct current stimulation and neuroimaging: Novel insights in understanding neuroplasticity. *Journal of Neurophysiology*, *107*(1), 1–4. <https://doi.org/10.1152/jn.00557.2011>
- Vestito, L., Rosellini, S., Mantero, M., Bandini, F. (2014). Long-Term Effects of Transcranial Direct-Current Stimulation in Chronic Post-Stroke Aphasia: a Pilot Study. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00785>
- Walsh, K., Darby, D., Mroziak, B. (2016). *Neuropsychologia kliniczna* (Wyd. 5). GWP.
- Walter, H., Wolf, R. C., Spitzer, M., Vasic, N. (2007). Increased left prefrontal activation in patients with unipolar depression: An event-related, parametric, performance-

- controlled fMRI study. *Journal of Affective Disorders*, 101(1–3), 175–185.
<https://doi.org/10.1016/j.jad.2006.11.017>
- Walter, K. H., Palmieri, P. A., Gunstad, J. (2010). More than symptom reduction: Changes in executive function over the course of PTSD treatment. *Journal of Traumatic Stress*, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/jts.20506>
- Wambach, D., Lamar, M., Swenson, R., Penney, D. L., Kaplan, E., Libon, D. J. (2011). Digit Span. w J. S. Kreutzer, J. DeLuca, B. Caplan (Red.), *Encyclopedia of Clinical Neuropsychology* (s. 844–849). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-0-387-79948-3_1288
- Wang, J., Wen, J.-B., Li, X.-L. (2018). No effect of transcranial direct current stimulation of the dorsolateral prefrontal cortex on short-term memory. *CNS Neuroscience Therapeutics*, 24(1), 58–63. <https://doi.org/10.1111/cns.12779>
- Wang, Z., Li, J., Wang, X., Liu, S., Wu, W. (2022). Effect of transcranial direct-current stimulation on executive function and resting EEG after stroke: a pilot randomized controlled study. *Journal of Clinical Neuroscience*, 103, 141–147.
<https://doi.org/10.1016/j.jocn.2022.07.010>
- Westwood, S. J., Radua, J., Rubia, K. (2021). Noninvasive brain stimulation in children and adults with attention-deficit/hyperactivity disorder: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Psychiatry and Neuroscience*, 46(1), E14–E33.
<https://doi.org/10.1503/jpn.190179>
- Wexler, A. (2017). Recurrent themes in the history of the home use of electrical stimulation: Transcranial direct current stimulation (tDCS) and the medical battery (1870–1920). *Brain Stimulation*, 10(2), 187–195. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.11.081>
- Wiejak, K., Krasowicz-Kupis, G. (2011). *Kliniczne zastosowania skal inteligencji D. Wechslera*. Pracownia Testów Psychologicznych Polskiego Towarzystwa Psychologicznego.
- Wiethoff, S., Hamada, M., Rothwell, J. C. (2014). Variability in Response to Transcranial Direct Current Stimulation of the Motor Cortex. *Brain Stimulation*, 7(3), 468–475.
<https://doi.org/10.1016/j.brs.2014.02.003>

- Williams, P. G., Thayer, J. F. (2009). Executive Functioning and Health: Introduction to the Special Series. *Annals of Behavioral Medicine*, 37(2), 101–105.
<https://doi.org/10.1007/s12160-009-9091-x>
- Wiłkość, M. (2015). Chronotyp, geny zegarowe i funkcjonowanie poznawcze u osób zdrowych w populacji polskiej. w *Samokontrola—Funkcje i Dysfunkcje: 24 Kolokwia Psychologiczne Komitetu Psychologii PAN* (s. 22–24). [b.w.].
- Woods, A. J., Antal, A., Bikson, M., Boggio, P. S., Brunoni, A. R., Celnik, P., Cohen, L. G., Fregni, F., Herrmann, C. S., Kappenman, E. S., Knotkova, H., Liebetanz, D., Miniussi, C., Miranda, P. C., Paulus, W., Priori, A., Reato, D., Stagg, C., Wenderoth, N., Nitsche, M. A. (2016). a technical guide to tDCS, and related non-invasive brain stimulation tools. *Clinical Neurophysiology*, 127(2), 1031–1048.
<https://doi.org/10.1016/j.clinph.2015.11.012>
- Wronka, E. (2004). Uwaga! - Mózg w działaniu. O neuronalnych podstawach mechanizmu uwagi. *Studia Psychologiczne*, 42(1), 11–23.
- Yamada, Y., Sumiyoshi, T. (2021). Neurobiological Mechanisms of Transcranial Direct Current Stimulation for Psychiatric Disorders; Neurophysiological, Chemical, and Anatomical Considerations. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15, 631838.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.631838>
- Yan, R., Zhang, X., Li, Y., Hou, J., Chen, H., Liu, H. (2020). Effect of transcranial direct-current stimulation on cognitive function in stroke patients: a systematic review and meta-analysis. *PLOS ONE*, 15(6), e0233903.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233903>
- Yun, G. J., Chun, M. H., Kim, B. R. (2015). The Effects of Transcranial Direct-Current Stimulation on Cognition in Stroke Patients. *Journal of Stroke*, 17(3), 354–358.
<https://doi.org/10.5853/jos.2015.17.3.354>
- Zaehle, T., Sandmann, P., Thorne, J. D., Jäncke, L., Herrmann, C. S. (2011). Transcranial direct current stimulation of the prefrontal cortex modulates working memory performance: Combined behavioural and electrophysiological evidence. *BMC Neuroscience*, 12(1), 2. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-12-2>

- Zajac-Lamparska, L., Trempała, J. (2016). Effects of working memory and attentional control training and their transfer onto fluid intelligence in early and late adulthood. *Health Psychology Report, 4*(1), 41–53. <https://doi.org/10.5114/hpr.2016.56846>
- Zandvakili, A., Berlow, Y. A., Carpenter, L. L., Philip, N. S. (2019). Transcranial Direct Current Stimulation in Psychiatry: What Psychiatrists Need to Know. *FOCUS, 17*(1), 44–49. <https://doi.org/10.1176/appi.focus.20180029>
- Zhu, C., Yu, B., Zhang, W., Chen, W., Qi, Q., Miao, Y. (2017). Effectiveness and safety of transcranial direct current stimulation in fibromyalgia: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Rehabilitation Medicine, 49*(1), 2–9. <https://doi.org/10.2340/16501977-2179>
- Zimmerman, M., Hummel, F. C. (2010). Non-Invasive Brain Stimulation: Enhancing Motor and Cognitive Functions In Healthy Old Subjects. *Frontiers in Aging Neuroscience, 2*. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2010.00149>
- Zink, N., Lenartowicz, A., Markett, S. (2021). a new era for executive function research: On the transition from centralized to distributed executive functioning. *Neuroscience Biobehavioral Reviews, 124*, 235–244. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.02.011>
- Zmigrod, S., Zmigrod, L., Hommel, B. (2016). Transcranial direct current stimulation (tDCS) over the right dorsolateral prefrontal cortex affects stimulus conflict but not response conflict. *Neuroscience, 322*, 320–325. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2016.02.046>

Spis tabel

Tabela 1 Przegląd wyników badań dotyczących tDCS i funkcjonowania poznawczego	36
Tabela 2 Zestawienie problemów i pytań badawczych.....	52
Tabela 3 Hipotezy i ich uzasadnienie.....	54
Tabela 4 Zmienne oraz ich wskaźniki	65
Tabela 5 Schemat badania z podziałem na grupy	67
Tabela 6 Charakterystyka osób badanych z podziałem na grupy: eksperymentalna (E), kontrolna aktywna (K-A), kontrolna pasywna (K-P).....	69
Tabela 7 Zestawienie samooceny stanu zdrowia i kondycji umysłowej osób badanych z podziałem na grupy: eksperymentalna (E), kontrolna aktywna (K-A), kontrolna pasywna (K-P).....	70
Tabela 8 Statystyki opisowe z wynikami testu Shapiro-Wilka w grupie eksperymentalnej dla pomiaru przed stymulacją	73
Tabela 9 Statystyki opisowe z wynikami testu Shapiro-Wilka w grupie kontrolnej aktywnej dla pomiaru przed stymulacją	73
Tabela 10 Statystyki opisowe z wynikami testu Shapiro-Wilka w grupie kontrolnej aktywnej dla pomiaru przed stymulacją	74
Tabela 11 Statystyki opisowe z wynikami testu Shapiro-Wilka w grupie eksperymentalnej dla pomiaru po stymulacji	76
Tabela 12 Statystyki opisowe z wynikami testu Shapiro-Wilka w grupie kontrolnej aktywnej dla pomiaru po stymulacji.....	76
Tabela 13 Statystyki opisowe z wynikami testu Shapiro-Wilka w grupie kontrolnej pasywnej dla pomiaru po stymulacji.....	78
Tabela 14 Statystyki opisowe z wynikami testu Shapiro-Wilka w grupie eksperymentalnej dla różnic pomiarów.....	80
Tabela 15 Statystyki opisowe z wynikami testu Shapiro-Wilka w grupie kontrolnej aktywnej dla różnic pomiarów.....	80
Tabela 16 Statystyki opisowe z wynikami testu Shapiro-Wilka w grupie kontrolnej pasywnej dla różnic pomiarów.....	82
Tabela 17 Różnice w zakresie pamięci operacyjnej w zależności od warunku badawczego .	84
Tabela 18 Statystyki opisowe dla powtarzania cyfr oraz CBT w zależności od pomiaru i grupy.....	85
Tabela 19 Statystyki opisowe dla BCST: % poprawnych ruchów oraz TOL: stosunku ruchów wykonanych do minimalnej liczby ruchów w zależności od pomiaru i grupy	85
Tabela 20 Różnice w zakresie procesu pobudzania w zależności od warunku badawczego..	88

Tabela 21 Statystyki opisowe dla CTT i GNG w zależności od pomiaru i grupy	89
Tabela 22 Statystyki opisowe dla zadań GNG i TOL w zależności od pomiaru i grupy.....	89
Tabela 23 Różnice w zakresie procesu hamowania w zależności od warunku badawczego..	91
Tabela 24 Statystyki opisowe dla zadań GNG dotyczących błędnych reakcji w zależności od pomiaru i grupy	92
Tabela 25 Różnice w zakresie procesu kontroli działania w zależności od warunku badawczego	93
Tabela 26 Statystyki opisowe dla CTT i BCST w zależności od pomiaru i grupy.....	94
Tabela 27 Statystyki opisowe dla zadań TOL w zależności od pomiaru i grupy	94
Tabela 28 Analiza związku między wyjściowym poziomem funkcjonowania poznawczego a uzyskaną poprawą po stymulacji tDCS, stymulacji sham i grupą kontrolną	97
Tabela 29 Korelacje zmian w pamięci operacyjnej a zmian w procesie pobudzania w grupie eksperymentalnej	101
Tabela 30 Korelacje zmian w pamięci operacyjnej a zmian w procesie pobudzania w grupie kontrolnej aktywnej.....	103
Tabela 31 Korelacje zmian w pamięci operacyjnej a zmian w procesie pobudzania w grupie kontrolnej pasywnej	104
Tabela 32 Korelacje zmian w pamięci operacyjnej ze zmianami w procesie hamowania przy podziale na warunek badawczy.....	105
Tabela 33 Korelacje zmian w pamięci operacyjnej ze zmianami w procesie hamowania przy podziale na warunek badawczy.....	107
Tabela 34 Różnice międzypłciowe w zakresie pamięci operacyjnej przy podziale na warunek badawczy	110
Tabela 35 Różnice międzypłciowe w zakresie procesu pobudzania w zależności od warunku badawczego.....	111
Tabela 36 Różnice międzypłciowe w zakresie procesu hamowania przy podziale na warunek badawczy	112
Tabela 37 Różnice międzypłciowe w zakresie procesu kontroli działania przy podziale na warunek badawczy	113

Spis rysunków

Rysunek 1 Model teoretyczny relacji pomiędzy zmiennymi	51
Rysunek 2 Podgląd stymulacji	56
Rysunek 3 Widok zadania Klocki Corsiego z PEBL	58
Rysunek 4 Widok zadania Go/No-Go z PEBL	60
Rysunek 5 Widok zadania BCST z PEBL	62
Rysunek 6 Widok zadania TOL z PEBL.....	63
Rysunek 7 Schemat analiz weryfikujących skuteczność stymulacji tDCS.....	71