MATLAB w analizie sygnałów EEG

Poradnik jest przeznaczony dla studentów neuropsychologii, którzy rozpoczynają pracę z sygnałami elektroencefalograficznymi (EEG) w środowisku MATLAB. Przedstawia wymagania techniczne, instalację oprogramowania, import danych oraz kolejne etapy analizy: przetwarzanie wstępne, usuwanie artefaktów, podział na epoki, wyznaczanie cech, analizę statystyczną i wizualizację wyników. Uzupełnieniem są przykłady poleceń i skryptów, porównanie narzędzi, lista kontrolna oraz propozycja zajęć praktycznych.

2. Wymagania systemowe

Wymagania sprzętowe i systemowe zależą od wydania MATLAB-a. Przed instalacją sprawdź aktualną tabelę zgodności MathWorks [1–3]. Do zajęć z niewielkimi zbiorami EEG zaleca się co najmniej 16 GB RAM i dysk SSD; większe badania mogą wymagać 32 GB RAM lub więcej. Akcelerator GPU nie jest wymagany do standardowej analizy EEG w EEGLAB. Dostępność poszczególnych pakietów narzędziowych należy sprawdzić w ramach licencji.

3. Niezbędne narzędzia i pakiety narzędziowe

W analizie EEG przydatne są następujące pakiety (linki do stron oficjalnych):

EEGLAB (SCCN, UC San Diego) jest środowiskiem do analizy EEG z interfejsem graficznym, skryptami MATLAB, metodami ICA i dodatkowymi wtyczkami. Wymagania wersji należy potwierdzić na stronie projektu [4, 5].

FieldTrip to otwartoźródłowy pakiet MATLAB do analizy EEG, MEG i iEEG, obejmujący m.in. przetwarzanie sygnału, analizę czasowo-częstotliwościową, rekonstrukcję źródeł i statystykę. Praca odbywa się głównie poprzez skrypty; należy używać wersji zgodnej z zainstalowanym MATLAB-em [6, 7].

Brainstorm jest otwartoźródłowym środowiskiem EEG/MEG z interfejsem graficznym. Może działać w MATLAB-ie lub jako aplikacja samodzielna korzystająca z odpowiedniego środowiska wykonawczego. Aktualną procedurę instalacji podaje dokumentacja [8, 9].

Psychtoolbox-3 służy do kontrolowanej prezentacji bodźców i rejestracji odpowiedzi, a nie do właściwej analizy sygnału EEG. Dokumentacja wskazuje MATLAB R2025b jako aktualnie testowaną wersję; starsze mogą działać, ale nie muszą być objęte wsparciem. Zgodność zależy także od systemu operacyjnego [10].

Signal Processing Toolbox zapewnia funkcje takie jak pwelch, butter, filtfilt i spectrogram, wykorzystywane w analizie sygnałów. Nie należy mylić go z odrębnym DSP System Toolbox [11].

Statistics and Machine Learning Toolbox (MATLAB) – pakiet MathWorks z funkcjami statystycznymi i uczenia maszynowego [12]. Przydaje się do analizy danych EEG (testów statystycznych, modelowania, korekcji wielokrotnych porównań). Zawiera testy (t-Studenta, ANOVA, nieparametryczne), narzędzia do FDR/Bonferroni, modele regresji i klasyfikacji.

Inne: w zależności od potrzeb można rozważyć *Optimization Toolbox* (szukanie parametrów), *Image Processing Toolbox* (przetwarzanie obrazów, używane np. przez niektóre wtyczki FieldTrip), *BioSig* lub *BCILAB* (dodatki do analizy sygnału biologicznego).

4. Instalacja i konfiguracja

MATLAB: zainstaluj wydanie zgodne z systemem operacyjnym oraz zweryfikuj posiadane licencje na wymagane dodatki. Po uruchomieniu wpisz ver, aby sprawdzić dostępne pakiety. Instrukcje dotyczące wersji i systemu są dostępne w dokumentacji MathWorks [1–3].

EEGLAB: pobierz pakiet ze strony projektu, rozpakuj go i dodaj wyłącznie główny folder do ścieżki MATLAB-a (bez ręcznego dodawania wszystkich podfolderów). Następnie uruchom eeglab; narzędzie samodzielnie skonfiguruje ścieżki. Wtyczki instaluj zgodnie z instrukcją i wymaganiami ich autorów [4, 5].

FieldTrip: Pobierz najnowszą wersję (GitHub lub strona). Rozpakuj i dodaj główny folder do ścieżki: np. addpath('path_to_fieldtrip'); ft_defaults;. To polecenie ustawi podstawową konfigurację. Od tej pory funkcje FieldTrip są dostępne, np. ft_przetwarzanie wstępne, ft_freqanalysis. W dokumentacji FieldTrip zaleca się ustawianie ścieżki przy starcie każdego skryptu.

Brainstorm: Załóż konto i pobierz najnowszą paczkę (Linux/Mac/Win) ze strony Brainstorm. Wypakuj do folderu i uruchom brainstorm (skrypt brainstorm.m). Program zaproponuje utworzenie bazy danych. Alternatywnie, można zastosować MATLAB do zainstalowania Brainstorm (dodanie ścieżki) oraz uruchomienia interfejs graficzny. Przykład w konsoli:

```
addpath('ścieżka_do_brainstorm\toolbox\brainstorm3');
   brainstorm;  % otwiera GUI Brainstorm
```

Brainstorm poprosi o utworzenie folderu bazy danych i import danych.

Psychtoolbox-3: postępuj zgodnie z instrukcją instalacji właściwą dla systemu i wydania MATLAB-a. Przed uruchomieniem eksperymentu zweryfikuj działanie prezentacji bodźców oraz dokładność znaczników czasu [10].

```
cd 'ścieżka_do_Psychtoolbox';
   SetupPsychtoolbox;
```

Wersję instalacji można sprawdzić poleceniem PsychtoolboxVersion. Przed badaniem EEG przetestuj synchronizację bodźców i wyzwalaczy (triggerów) ze sprzętem rejestrującym.

Inne pakiety narzędziowe MATLAB: Zainstaluj przez *Add-On Explorer* w środowisku MATLAB lub Menedżera Pakietów (Add-Ons) pakiety Signal Processing, Statistics and Machine Learning, itp. Po instalacji uruchom ver aby sprawdzić dostępność.

5. Import formatów EEG

Pierwszym etapem pracy jest zaimportowanie danych EEG z różnych formatów. Najczęściej spotykane formaty to:

EDF/BDF: formaty zapisu biosygnałów. W EEGLAB można importować je przez wtyczkę BIOSIG, np. pop_biosig (jeżeli jest zainstalowana). W FieldTrip wykorzystuje się konfigurację cfg.dataset. Po imporcie sprawdź jednostki, częstość próbkowania, typy kanałów i znaczniki zdarzeń [4, 6].

BrainVision: zestaw plików, zwykle .vhdr, .vmrk i .eeg. Przy imporcie należy zachować komplet plików oraz ich wzajemne odwołania. W EEGLAB stosuje się m.in. odpowiednią wtyczkę importu (np. bva-io) lub File-IO; w FieldTrip używa się cfg.dataset wskazującego plik nagłówka.

EEGLAB (.set/.fdt): format własny EEGLAB. Łatwa obsługa: `EEG = pop_loadset('nazwa.set')`.

Pozostałe możliwości: .mat z danymi (EEGLAB, FieldTrip), .txt/.csv (konwertowane do struktur EEG), .cnt, .gdf itp. Wiele narzędzi (EEGLAB, FieldTrip, Brainstorm) oferuje import wieloformatowy [4]. W razie potrzeby przekształć formaty (np. z .edf do .set) za pomocą odpowiednich funkcji lub konwerterów (np. EEGLAB BIOSIG).

Przykład wczytania sygnału BDF i filtrowania w EEGLAB:

```
EEG = pop_biosig('EEGdata.bdf');          % import surowych danych
EEG = eeg_checkset(EEG);
EEG = pop_eegfiltnew(EEG, 1, 40);          % filtr pasmowy 1–40 Hz
```

Lub w FieldTrip:

```
cfg = [];
cfg.dataset = 'EEGdata.bdf';
cfg.trialdef.eventtype = 'Stimulus';
cfg.trialdef.eventvalue = 1;
cfg.trialdef.prestim = 0.2;
cfg.trialdef.poststim = 0.8;
cfg = ft_definetrial(cfg);
data = ft_preprocessing(cfg);
```

6. Przetwarzanie wstępne

Kroki przetwarzania wstępnego obejmują m.in.:

Filtrowanie: parametry zależą od celu badania. Dla ERP z wolnymi komponentami często rozważa się łagodniejszy filtr górnoprzepustowy (np. 0,01–0,1 Hz), natomiast do obliczania ICA może być przydatna kopia sygnału przefiltrowana od około 1 Hz. Nie należy bezrefleksyjnie stosować filtru 1 Hz do ostatecznej analizy wolnych ERP. Filtr 50 Hz stosuj przy stwierdzonych zakłóceniach sieciowych, z uwzględnieniem możliwych zniekształceń [4, 13, 14].

Zmiana odniesienia (re-referencja): wybierz odniesienie na podstawie montażu elektrod i planu analizy; wykonaj je na odpowiednim, udokumentowanym etapie przetwarzania, a nie dopiero po zakończeniu analiz. Średnie odniesienie wymaga odpowiedniej liczby i rozmieszczenia sprawnych elektrod. Zmiana odniesienia wpływa na amplitudy i przestrzenne zależności między kanałami.

Usuwanie artefaktów: w pierwszej kolejności oceń zapis i wykryj wadliwe kanały oraz silnie zakłócone fragmenty. ICA rozdziela aktywność na składowe statystycznie niezależne; nie utożsamiaj konkretnej składowej z pojedynczą elektrodą Fp1/Fp2. Składowe przeznaczone do odrzucenia należy identyfikować na podstawie topografii, widma, przebiegu czasowego i ewentualnie klasyfikatora ICLabel, a decyzję zapisać. Przed ICA sprawdź rangę danych.

Kontrola jakości: sprawdź brakujące próbki, saturację, skoki amplitudy, dryft, szum liniowy i uszkodzone elektrody. Kryteria odrzucania kanałów zależą od systemu rejestrującego, jednostek oraz rodzaju zadania; pojedynczy uniwersalny próg amplitudy nie jest wystarczający. Interpolację wykonuj tylko dla uzasadnionych przypadków i opisuj jej zakres.

7. Segmentacja i podział na epoki

Segmenty (epoki) wyznacza się względem znaczników zdarzeń, np. od −200 do 800 ms. Korekcja poziomu bazowego polega na odjęciu średniej z wybranego okresu odniesienia, np. −200–0 ms; nie zastępuje automatycznie prawidłowej filtracji ani kontroli artefaktów. Przed uśrednianiem sprawdź liczebność prób, zgodność kodów bodźców, odrzucone epoki i poprawność synchronizacji znaczników.

8. Ekstrakcja cech

Z przetworzonych epok można wydobyć różne miary (cechy):

PSD (gęstość widmowa mocy): szacuje się ją m.in. metodą Welcha (pwelch). Rozdzielczość wynikająca z długości obserwacji wynosi w przybliżeniu 1/T: okno 1 s pozwala rozdzielać składowe w skali około 1 Hz. Zwiększenie nfft przez dopełnienie zerami zagęszcza próbki widma, ale nie poprawia rzeczywistej zdolności rozdzielczej. Analiza najniższych pasm wymaga odpowiednio długich okien.

ERP (potencjały związane ze zdarzeniem): uśredniony przebieg epok przypisanych do tego samego warunku. Po właściwym oczyszczeniu, korekcji bazowej i uśrednieniu można wyznaczać amplitudę oraz latencję składników, takich jak N100 lub P300. Okno pomiarowe i zestaw elektrod należy określić przed analizą lub uzasadnić je na podstawie niezależnych przesłanek.

Analiza czasowo-częstotliwościowa: wykorzystuje m.in. falki Morleta i metodę wielookienkową. Liczba cykli falki, długość okna i krok czasowy decydują o kompromisie między rozdzielczością czasową i częstotliwościową. Dla niskich częstotliwości konieczne są dostatecznie długie okna; nie każda kombinacja 1 Hz i krótkich epok umożliwia wiarygodną estymację [7].

Łączność funkcjonalna: koherencja, PLV i pokrewne miary opisują statystyczne zależności między sygnałami, ale same nie dowodzą połączeń anatomicznych ani kierunku przepływu informacji. Wyniki mogą być zawyżone przez przewodnictwo objętościowe, wspólne odniesienie i artefakty. Należy rozważyć miary mniej wrażliwe na sprzężenie o zerowym opóźnieniu oraz odpowiednie analizy kontrolne.

9. Analiza statystyczna

Wyniki analizy cech (np. rozkłady mocy, amplitudy ERP) często poddaje się testom statystycznym:

Testy parametryczne: test t dla prób zależnych lub niezależnych i ANOVA wymagają właściwego planu badania oraz weryfikacji założeń. Jednostką niezależnej obserwacji jest zwykle uczestnik, a nie każda próbka sygnału. Dla badań z powtarzanymi pomiarami należy uwzględnić zależność wewnątrzosobniczą.

Testy permutacyjne: umożliwiają ocenę statystyki pod hipotezą zerową przy poprawnie zdefiniowanej wymienialności obserwacji. W analizie klastrowej należy określić sąsiedztwo kanałów, próg tworzenia klastrów oraz schemat randomizacji. Liczba permutacji i sposób testowania wymagają raportowania; test klastrowy nie pozwala automatycznie precyzyjnie lokalizować efektu w czasie i przestrzeni.

Wielokrotne porównania: korekcja Bonferroniego kontroluje rodzinny błąd I rodzaju (FWER), procedury FDR kontrolują oczekiwany odsetek fałszywych odkryć, a testy permutacyjne oparte na

maksimum statystyki lub klastrach mogą kontrolować FWER w określonej rodzinie testów. Metody te nie są zamienne; wybór należy uzasadnić.

10. Wizualizacja wyników

Po analizie wygeneruj wykresy ilustrujące wyniki:

Mapy topograficzne: Graficzny rozkład mocy lub amplitudy na powierzchni głowy. W EEGLAB: topoplot (mapy 2D). W Brainstorm: zakładka „2D Heads" czy „3D Brain". Przykłady: topografia mocy alfa, rozkład ERP (widmo topograficzne).

Wykresy czasowe: Przebiegi ERP lub sygnałów kanałowych – użyj plot lub ft_singleplotER. Wyświetl średnią i np. błąd standardowy.

Widma i spektrogramy: Wykres PSD dla wybranych kanałów (plot(freq, psd)) oraz spektrogram (np. spectrogram w środowisku MATLAB) pokazujący rozkład mocy w czasie. W Brainstorm można tworzyć mapy czasowo-częstotliwościowe lub wykorzystać ft_multiplotTFR w FieldTrip.

Pozostałe możliwości: Rysowanie macierzy korelacji/spoistości czy dynamiczne wykresy (animacje wyników) może być użyteczne. Ważne jest czytelne oznaczenie osi i legend.

11. Przykładowe skrypty w języku MATLAB

```
% EEGLAB: przykład edukacyjny, nie gotowy protokół kliniczny
EEG = pop_loadset('filename', 'przyklad.set', 'filepath', './dane/');
EEG = eeg_checkset(EEG);
% Filtrację wybierz zgodnie z hipotezą i rodzajem ERP.
EEG = pop_eegfiltnew(EEG, 0.1, 30);
% Przed ICA sprawdź kanały, rangę danych i jakość zapisu.
% ICA uruchamiaj dopiero po odpowiednim przygotowaniu danych.
% EEG = pop_runica(EEG, 'icatype', 'runica', 'extended', 1);
% Nie usuwaj składowych na podstawie stałych numerów [1 2].
% Po zweryfikowaniu składowych można użyć pop_subcomp.
EEG = pop_epoch(EEG, {'1'}, [-0.2 0.8]);
EEG = pop_rmbase(EEG, [-200 0]);
% ERP dla kanału 1 (jeżeli kanał jest właściwym kanałem EEG):
czas_ms = EEG.times;
erp_uV = mean(double(EEG.data(1, :, :)), 3);
figure; plot(czas_ms, erp_uV); grid on;
xlabel('Czas [ms]'); ylabel('Amplituda [\muV]');
title('ERP: średnia z epok, kanał 1');

% FieldTrip: przykład importu i widma mocy
addpath('path_to_fieldtrip');
ft_defaults;
cfg = [];
cfg.dataset = 'przyklad.bdf';
cfg.trialdef.eventtype = 'Stimulus';  % dostosuj do zapisu
cfg.trialdef.eventvalue = 1;       % dostosuj do zapisu
cfg.trialdef.prestim = 0.2;
cfg.trialdef.poststim = 0.8;
cfg = ft_definetrial(cfg);
data = ft_preprocessing(cfg);
cfg = [];
cfg.method = 'mtmfft';
cfg.output = 'pow';
cfg.foilim = [1 40];
```

```
cfg.taper = 'hanning';
freq = ft_freqanalysis(cfg, data);
% Domyślnie powspctrm ma wymiary: kanał x częstotliwość.
figure; plot(freq.freq, freq.powspctrm(1, :)); grid on;
xlabel('Częstotliwość [Hz]'); ylabel('Moc [jednostki^2/Hz]');
% Dla epok 1 s interpretacja widma 1 Hz jest ograniczona.
```

12. Dobre praktyki i najczęstsze błędy

Dokumentuj każdy krok: Twórz skrypty zamiast ręcznych kliknięć; zapisuj parametry filtrów, wyboru komponentów itp. Dzięki temu proces jest powtarzalny i weryfikowalny.

Wybór filtrów: nie używaj jednego zestawu parametrów do wszystkich badań. Filtr górnoprzepustowy 1 Hz bywa korzystny dla ICA, ale może zniekształcać wolne ERP; dla takich analiz rozważ łagodniejszą filtrację. Dokumentuj pasmo przejściowe, typ filtru, rząd i sposób filtrowania (jedno- lub dwukierunkowy).

Kontrola artefaktów: Nie usuwaj zbyt dużej liczby komponentów ICA – można przypadkowo odciąć sygnał neurologiczny. Zawsze oglądaj topografie i wykresy komponentów.

Zmiana odniesienia: zaplanuj i udokumentuj ją przed analizą końcową. Ustal jej kolejność względem wykrywania uszkodzonych kanałów, interpolacji oraz ICA. Nie traktuj zmiany odniesienia wyłącznie jako zabiegu wizualizacyjnego.

Sprawdzenie danych: Po każdym etapie obejrzyj dane (np. eegplot w EEGLAB) – upewnij się, że filtr nie wprowadził artefaktów na krawędziach, a ICA oddzieliła oczekiwane sygnały.

Parametry analizy: Typowe pułapki to niezrozumienie działania funkcji. Przykładowo, w pop_epoch granice są w sekundach. Zawsze weryfikuj wymiary i jednostki.

Wybór narzędzi: Każde narzędzie ma swoją specyfikę – np. Brainstorm ma wygodny interfejs graficzny, ale ma swoją strukturę plików. Zapoznaj się z dokumentacją. Unikaj mieszania surowych formatów – trzymaj się jednego formatu (np. zawsze pracuj na plikach EEGLAB lub FieldTrip).

13. Tabele porównawcze

Tabela 1. Porównanie narzędzi do analizy EEG i prowadzenia eksperymentów:

Narzędzie	Główne funkcje / opis	Zalety	Wady / ograniczenia	Wymagania
EEGLAB	GUI i skrypty MATLAB; ICA, ERP, analiza czasowo-częstotliwościowa [4].	Liczne wtyczki; szerokie zastosowanie badawcze.	Wymaga znajomości parametrów metod i walidacji wyników.	MATLAB; szczegóły zgodności zależne od wersji [5].
FieldTrip	Pakiet MATLAB do EEG/MEG/iEEG, źródeł, analizy widmowej i statystyki [6, 7].	Duża elastyczność i przejrzyste skrypty.	Stroma krzywa uczenia; brak głównego GUI.	MATLAB; sprawdź zgodność bieżącego wydania.
Brainstorm	Środowisko GUI do analizy EEG/MEG [8, 9].	Przyjazny interfejs; wariant samodzielny.	Własna struktura bazy danych i przebieg pracy.	MATLAB albo kompatybilne środowisko uruchomieniowe.
Psychtoolbox-3	Prezentacja bodźców, pomiar czasu i rejestracja reakcji [10].	Narzędzia do eksperymentów behawioralnych.	Nie jest pakietem analizy EEG; wymaga kontroli	MATLAB R2025b: wersja testowana według dokumentacji

Narzędzie	Główne funkcje / opis	Zalety	Wady / ograniczenia	Wymagania
			synchronizacji.	[10].

Tabela 2. Lista kontrolna etapów przetwarzania EEG z typowymi parametrami:

Krok / Etap	Przykładowe parametry / uwagi
Filtrowanie pasmowe (band-pass)	Dobierz do celu; np. 0,1–30 Hz dla wybranych analiz ERP; pasmo musi zachować komponenty istotne dla hipotezy.
Filtracja dolnoprzepustowa	Wartość graniczna zależy od rejestrowanego pasma i interesujących cech sygnału.
Filtracja zaporowa (notch)	Tylko gdy występują zakłócenia sieciowe (w Polsce 50 Hz); oceń zniekształcenia i metody alternatywne.
Filtracja górnoprzepustowa	Dla ICA często około 1 Hz; dla wolnych ERP rozważ 0,01–0,1 Hz [13, 14].
Zmiana odniesienia	Wybierz zgodnie z montażem; zastosuj na właściwym etapie, uwzględnij jakość elektrod.
Wykrywanie uszkodzonych kanałów	Oceń szum, brak kontaktu, saturację i wariancję; nie stosuj jednego uniwersalnego progu 100 µV.
Usuwanie artefaktów (ICA)	ICA po kontroli rangi danych; oceniaj topografię, czas, widmo i ewentualnie ICLabel; udokumentuj decyzje.
Podział na epoki	zakres np. –200 ms do 800 ms od zdarzenia; okres odniesienia = –200–0 ms.
Korekcja bazowa	odjęcie średniej z okresu bazowego (np. –200–0 ms) od każdej epoki.
Ekstrakcja PSD	Metoda Welcha: rozdzielczość zależy od długości okna (≈ 1/T), a nie tylko od nfft.
Ekstrakcja ERP	średnia sygnału w epokach po korekcji bazowej; analiza latencji i amplitudy.
Analiza czasowo-częst. (TF)	Falki Morleta lub wielookienkowa metoda FFT; dobierz długość okna i liczbę cykli do pasma.
Analiza łączności	Raportuj wpływ odniesienia, przewodnictwa objętościowego i artefaktów; łączność ≠ połączenie anatomiczne.
Testy parametryczne	Test zależny/niezależny zgodnie z planem; określ jednostkę analizy, rozmiar efektu i korekcję porównań.
Testy nieparametryczne	Permutacje z zachowaniem wymienialności; określ hipotezę, sąsiedztwo i sposób kontroli FWER/FDR.

Bibliografia

[1] MathWorks. MATLAB: wymagania systemowe dla Windows. https://www.mathworks.com/support/requirements/matlab-system-requirements.html

[2] MathWorks. MATLAB: wymagania systemowe dla macOS. https://www.mathworks.com/support/requirements/matlab-system-requirements.html

[3] MathWorks. MATLAB: wymagania systemowe dla Linux. https://www.mathworks.com/support/requirements/matlab-system-requirements.html

[4] EEGLAB (SCCN, UC San Diego). Funkcjonalność i dokumentacja. https://eeglab.org/

[5] EEGLAB. Wersje, pobieranie i wymagania oprogramowania. https://sccn.ucsd.edu/eeglab/download.php

[6] FieldTrip. Dokumentacja i wersje narzędzia. https://www.fieldtriptoolbox.org/

[7] FieldTrip. Dokumentacja analizy EEG/MEG i metod czasowo-częstotliwościowych. https://www.fieldtriptoolbox.org/

[8] Brainstorm. Dokumentacja i wymagania narzędzia. https://neuroimage.usc.edu/brainstorm/

[9] Brainstorm. Dokumentacja uruchamiania w trybie MATLAB i samodzielnej. https://neuroimage.usc.edu/brainstorm/

[10] Psychtoolbox-3. Wymagania systemowe i zasady kompatybilności. https://psychtoolbox.org/requirements

[11] MathWorks. Signal Processing Toolbox: dokumentacja. https://www.mathworks.com/products/signal.html

[12] MathWorks. Statistics and Machine Learning Toolbox: dokumentacja. https://www.mathworks.com/products/statistics.html

[13] EEGLAB. Filtering tutorial. https://eeglab.org/tutorials/05_Preprocess/Filtering.html

[14] EEGLAB SCCN. Makoto's preprocessing pipeline. https://eeglab.ucsd.edu/wiki/Makoto%27s_preprocessing_pipeline

[15] FieldTrip. Time-frequency analysis tutorial. https://www.fieldtriptoolbox.org/tutorial/sensor/timefrequencyanalysis/

[16] FieldTrip. ft_freqanalysis, implementacja i opis pól. https://github.com/fieldtrip/fieldtrip/blob/master/ft_freqanalysis.m