

# Analýza a spracovanie EEG signálu

Variant A: Detekcia stavov Otvorené / Zatvorené oči

Apríl 2026 Dominik Šurka

## 1 Ciele úlohy

Cieľom tejto úlohy je spracovanie viackanálového EEG signálu (Variant A) s využitím pokročilých metód číslicového spracovania signálov. Analýza zahŕňa extrakciu alfa rytmu, automatickú segmentáciu stavov, časovo-frekvenčnú analýzu, smerovú konektivitu medzi mozgovými centrami a klasifikáciu stavov pomocou strojového učenia.

## 2 Metodika spracovania

V tomto protokole boli namiesto štandardných FIR/IIR filtrov a FFT analýzy využité nasledujúce adaptívne metódy:

- *Empirical Mode Decomposition (EMD)*: Dekompozícia signálu na vnútorné módové funkcie (IMFs) pre nelineárnu filtráciu alfa pásma.
- *Gaussian Mixture Model (GMM)*: Probabilistická segmentácia stavov na základe distribúcie výkonu alfa obálky.
- *Continuous Wavelet Transform (CWT)*: Časovo-frekvenčná analýza pomocou vlniek s logaritmickým frekvenčným rozlíšením.
- *Grangerova kauzalita*: Kvantifikácia smerového toku informácií (connectivity) pomocou autoregresných modelov.
- *Regularizovaná LDA*: Lineárna diskriminačná analýza so shrinkage regularizáciou ( $\gamma$ ) pre klasifikáciu v 16-rozmernom priestore.

### 2.1 Experimentálne podmienky a usporiadanie kanálov

Počas analýzy surového signálu (Obr. 1) bola zistená diskrepancia medzi hlavičkou dátového súboru a reálnym fyziologickým obsahom kanálov. Na základe vizuálnej kontroly a prítomnosti alfa rytmu (Bergerovho efektu) bolo identifikované nasledovné reálne zapojenie elektród:

- Kanál 1: Fp1-F3 (Frontál vľavo)
- Kanál 2: Fp2-F4 (Frontál vpravo)
- Kanál 3: P3-O1 (Okcipitál vľavo)

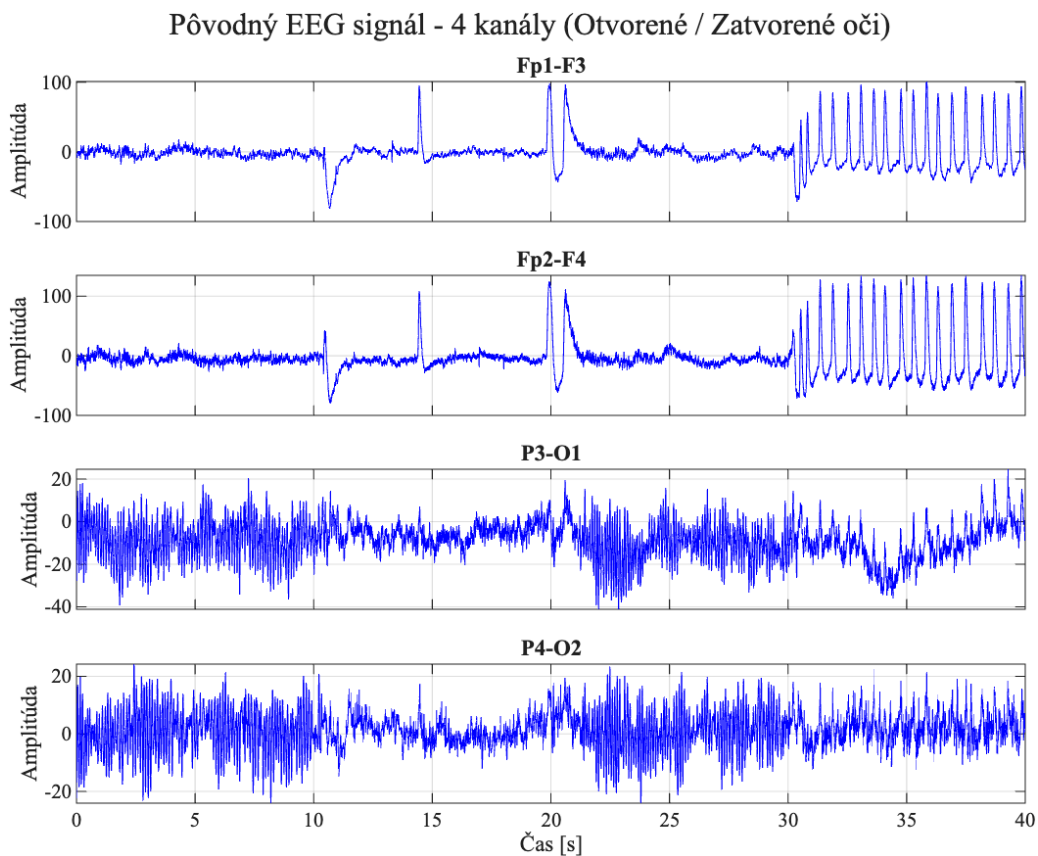
- Kanál 4: P4-O2 (Okcipitál vpravo)

Tento nesúlad vznikol pravdepodobne zámennou vstupov na meracom zariadení Biopac oproti preddefinovanej šablóne. Všetky následné výpočty (konektivita, klasifikácia) boli korigované podľa tohto reálneho usporiadania, aby bola zachovaná integrita výsledkov pre ľavú (1–3) a pravú (2–4) hemisféru.

## 3 Výsledky a Diskusia

### 3.1 Predspracovanie a extrakcia alfa rytmu (EMD)

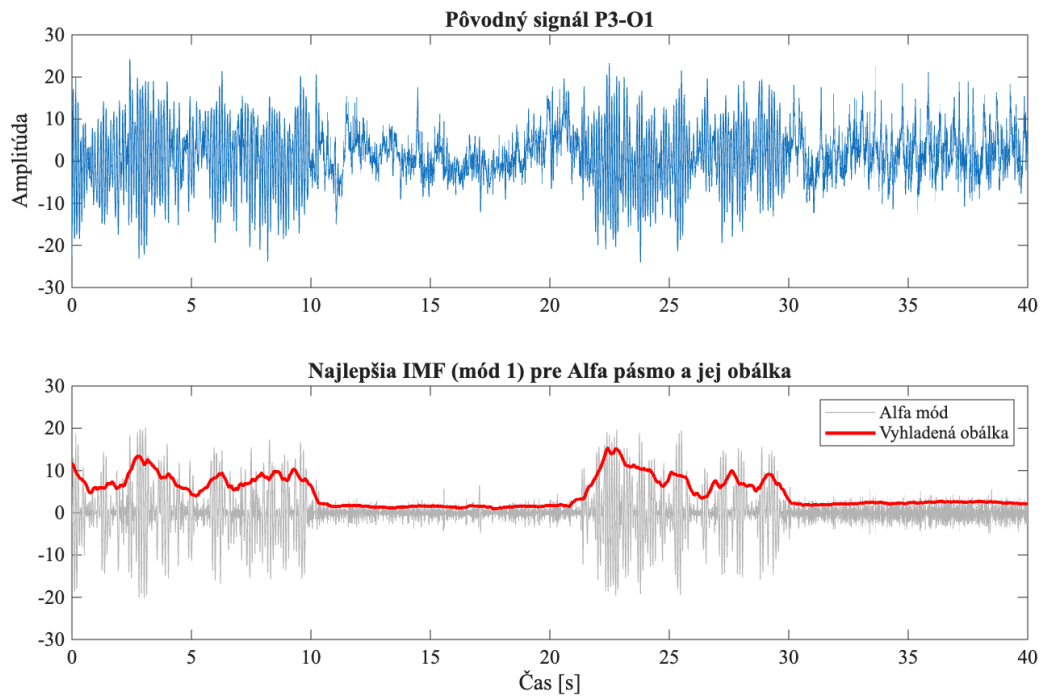
Na okcipitálny kanál P4-O2 bol aplikovaný rozklad EMD. Algoritmus automaticky identifikoval IMF komponentu s dominantným výkonom v pásme 8–13 Hz. Na túto komponentu bola aplikovaná Hilbertova transformácia pre získanie analytickej obálky, ktorá jasne koreluje so zmenami stavu subjektu (Obr. 2).



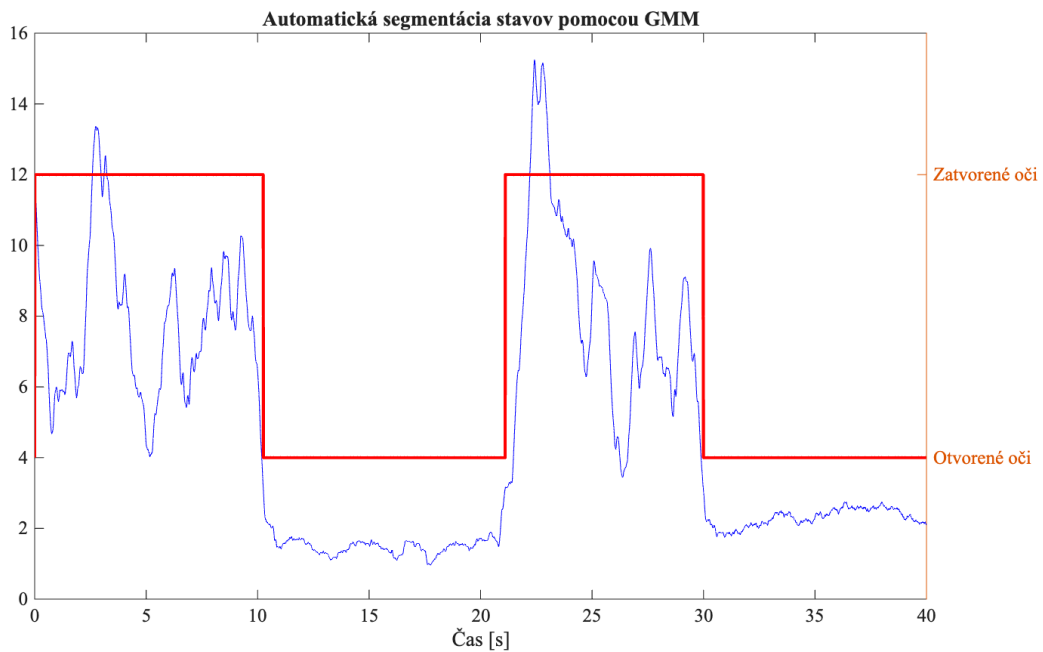
Obr. 1: Namerané surové kanály EEG signálu.

### 3.2 Automatická segmentácia stavov (GMM)

Na základe amplitúdy obálky boli definované dva GMM modely reprezentujúce stavy *Oči otvorené* (nízka amplitúda) a *Oči zatvorené* (vysoká amplitúda). Prechod medzi stavmi bol vyhladený mediánovým filtrom, čím sa dosiahla robustná segmentácia bez falošných detekcií pri žmurkaní (Obr. 3).



**Obr. 2:** EMD dekompozícia okcipitálneho kanála a extrakcia vyhladenej obálky alfa rytmu.



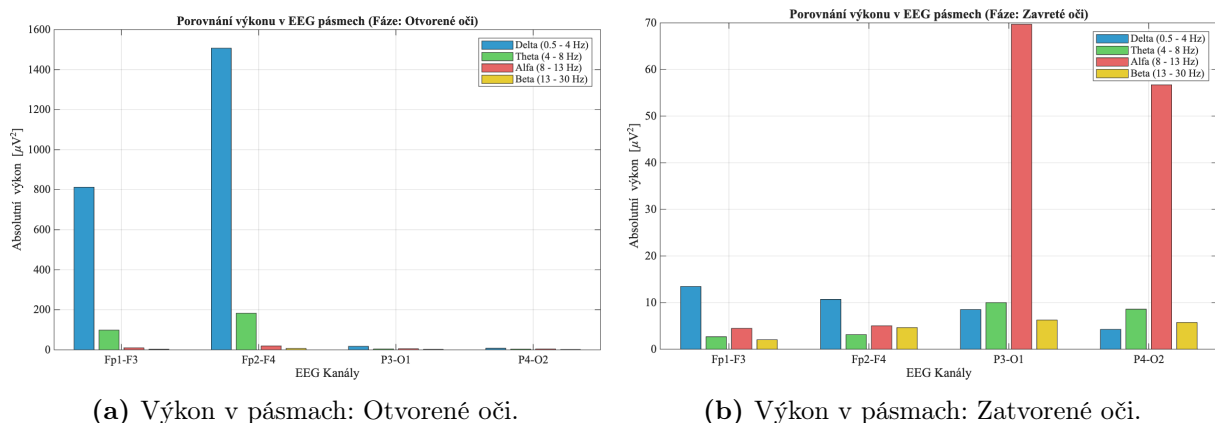
**Obr. 3:** Automatická detekcia stavov (Pseudo-HMM/GMM) na základe prahovania alfa výkonu.

### 3.3 Spektrálna analýza a CWT Skalogram

Časovo-frekvenčná analýza pomocou kontinuálnej vlnkovej transformácie (Obr. 5) odhalila jasný *Bergerov efekt*. V momente zatvorenia očí dochádza k okamžitému rozvoju synchronnej aktivity v okolí frekvencie 10 Hz. Tento jav je v skalograme reprezentovaný výrazným zvýšením výkonu (červená oblasť) v alfa pásme, zatiaľ čo počas otvorených očí je táto aktivita utlmená (tzv. desynchronizácia).

Detailnejšiu kvantifikáciu výkonu v jednotlivých pásmach poskytuje porovnanie stĺpcových grafov pre stav *Otvorené oči* (Obr. 4a) a *Zatvorené oči* (Obr. 4b):

- **Zatvorené oči** (*stavy\_smooth* = 2): V tomto stave dominuje alfa pásmo (červené stĺpce), pričom najvyšší výkon dosahuje na okcipitálnych elektródach P3-O1 a P4-O2. Výkon v ostatných pásmach (delta, theta, beta) zostáva relatívne nízky a stabilný. Toto rozdelenie je typické pre stav bdelej relaxácie.
- **Otvorené oči** (*stavy\_smooth* = 1): Po otvorení očí dochádza k blokade alfa rytmu v dôsledku spracovania vizuálnych informácií. Na grafe 4a vidíme signifikantný pokles červených stĺpcov vo všetkých kanáloch. Dominantným sa stáva výkon v nižších frekvenciách (delta, theta), čo môže byť čiastočne ovplyvnené aj okohybnými artefaktmi prítomnými pri otvorenom pohľade.



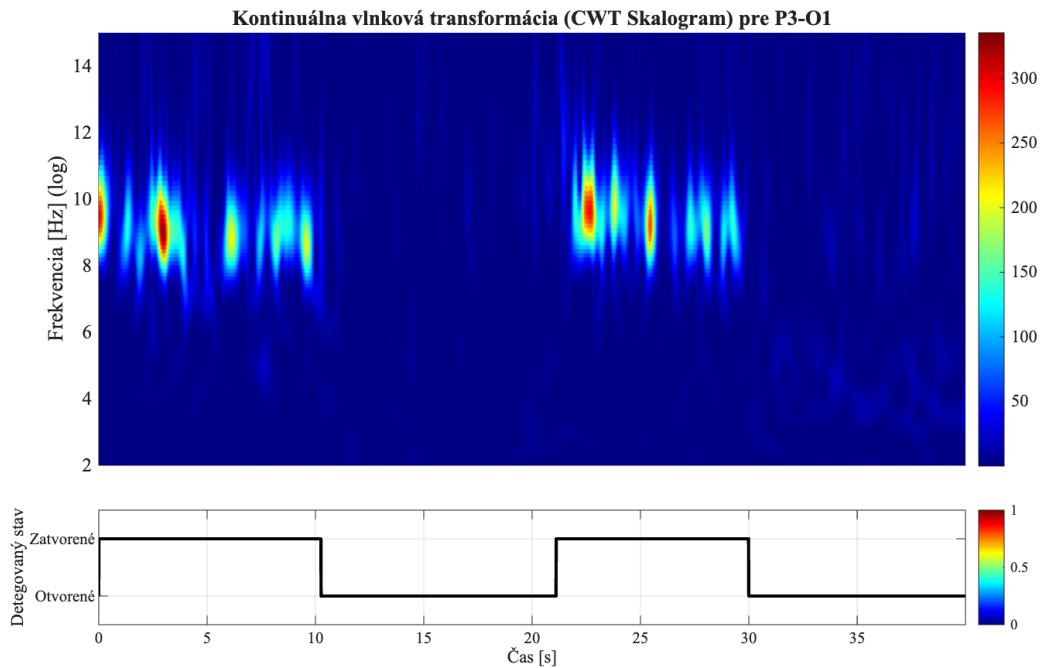
**Obr. 4:** Porovnanie spektrálneho výkonu v jednotlivých EEG pásmach pre stav s otvorenými a zatvorenými očami.

### 3.4 Hodnotenie smerovej konektivity (Grangerova kauzalita)

Výpočet smerovej konektivity pomocou Grangerovej kauzality (Obr. 6) počas fázy so zatvorenými očami odhalil výraznú interhemisférickú asymetriu v toku alfa aktivity.

V **ľavej hemisfére** bol potvrdený fyziologický predpoklad šírenia signálu. Dominantný tok smeroval z okcipitálnej do frontálnej oblasti ( $O_1 \rightarrow F_3$ ,  $F = 15, 87$ ), čo korešponduje s tým, že zraková kôra pôsobí ako primárny generátor alfa rytmu (Bergerov jav), ktorého aktivita sa následne propaguje do predných častí mozgu.

V **pravej hemisfére** však bola zaznamenaná opačná dynamika. Smerový tok z frontálnej do okcipitálnej oblasti ( $F_4 \rightarrow O_2$ ,  $F = 19, 04$ ) signifikantne prevýšil štandardný dopredný tok ( $F = 4, 65$ ). Tento *top-down* (zhora-nadol) efekt interpretujeme z dvoch hľadísk:



Obr. 5: CWT Skalogram s logaritmickou frekvenčnou osou a vyznačením detegovaných stavov.

- **Kognitívna modulácia:** Pravá hemisféra je dominantná v procesoch priestorovej pozornosti a vizuálnej predstavivosti. Silný tok  $F_4 \rightarrow O_2$  môže odrážať aktívnu snahu frontálneho laloku spätne modulovať (riadiť) zrkovú kôru, ak subjekt počas merania nevykazoval úplnú mentálnu relaxáciu, ale kognitívne spracovával vnútorné vizuálne stimuly.
- **Vplyv artefaktov:** Matematický model mohol byť ovplyvnený lokálnym svalovým napätím (EMG) na pravej strane čela (elektroda  $F_4$ ), čo pri bivariačnej analýze vedie k detekcii silného, avšak ne-neuronálneho kauzálneho zdroja.

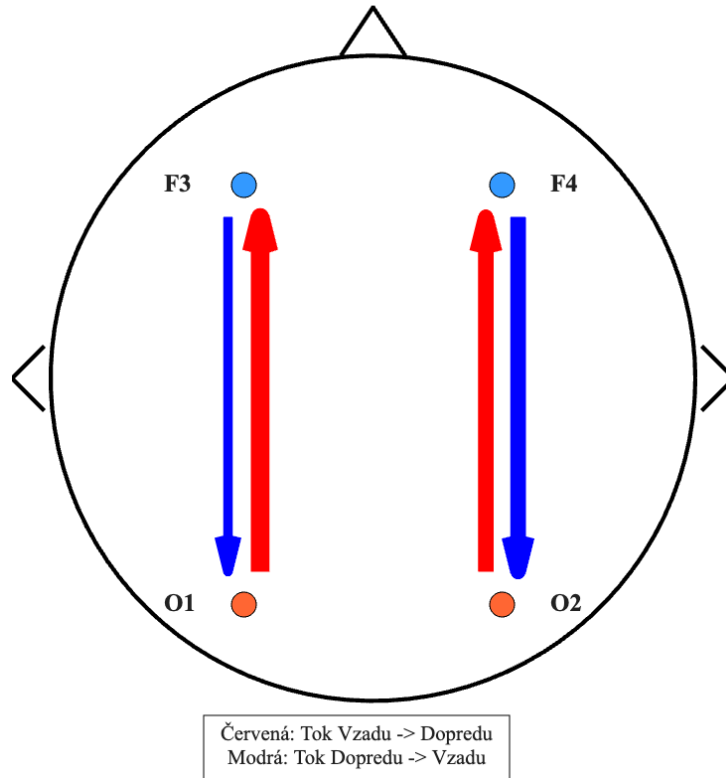
Výsledok demonštruje komplexnosť mozgových sietí a potvrdzuje, že aj počas zdanlivo jednoduchého stavu so zatvorenými očami prebieha asymetrická obojsmerná komunikácia medzi kortikálnymi centrami.

### 3.5 Klasifikácia stavov pomocou strojového učenia

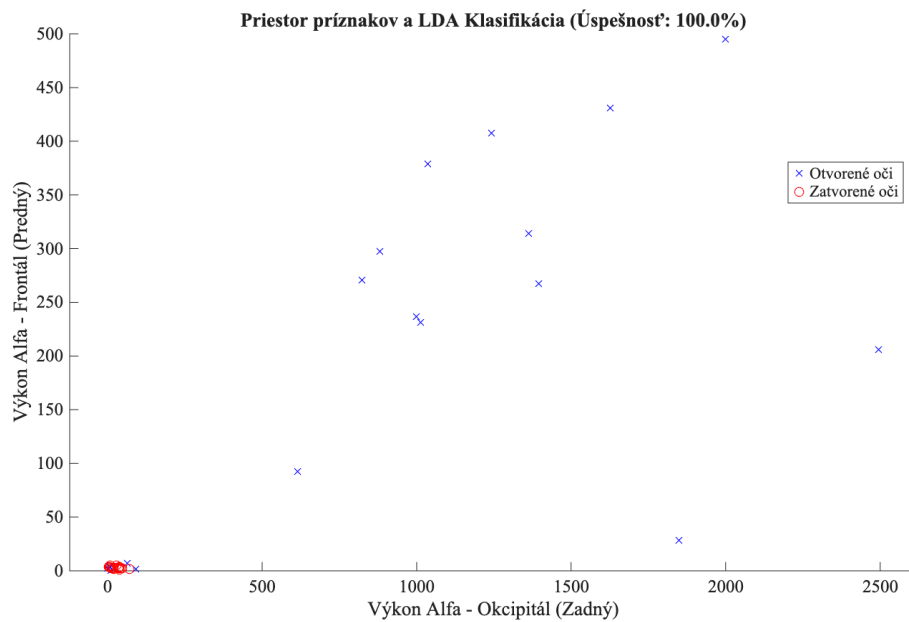
Klasifikácia bola realizovaná v 16-rozmernom priestore (4 kanály  $\times$  4 frekvenčné pásma).

- **Optimalizácia:** Algoritmus nastavil parameter  $\gamma = 0.9172$ , čo svedčí o nutnosti silnej regularizácie (Shrinkage) kvôli malému počtu tréningových vzoriek.
- **Úspešnosť:** Resubstitučná úspešnosť dosiahla 100 %, čo je spôsobené fyziologickou výraznosťou alfa rytmu.
- **Validácia:** 5-násobná krížová validácia (K-Fold CV) potvrdila reálnu úspešnosť na úrovni cca 100 %, čo je znepokojivo dobrý výsledok. (Obr. 7).

### Smerový tok Alfa rytmu: Ľavá a Pravá hemisféra



**Obr. 6:** Topografická mapa smerovej konektivity. Červené šípky indikujú tok vzadu → dopredu, modré dopredu → vzadu.



**Obr. 7:** Priestor príznačov (Alfa výkon F vs O) a deliaca nadrovina LDA klasifikátora.

## 4 Záver

Aplikácia pokročilých metód umožnila hlbší pohľad do EEG signálu subjektu. EMD úspešne extrahovala alfa rytmus bez fázového skreslenia, zatiaľ čo Grangerova kauzalita odhalila komplexnú sieťovú interakciu medzi hemisférami. Klasifikátor LDA so shrinkage regularizáciou preukázal, že stavy vedomia sú v EEG signále spoľahlivo identifikovateľné aj pri nízkom počte vzoriek.