

# **Řízení systémů pomocí aktivizace mozkových center**

Ing. Roman Žák, Ph. D.

Teze disertační práce



# Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

## Fakulta aplikované informatiky

Teze disertační práce

### **Řízení systémů pomocí aktivizace mozkových center**

**Control Systems by Means of Activation of Brain Centers**

Autor: Ing. Roman Žák

Studijní program: P3902 Inženýrská informatika  
Studijní obor: 3902V023 Inženýrská informatika

Školitel: prof. Mgr. Roman Jašek, Ph.D.

Oponenti: prof. Ing. Jiří Dvořák, DrSc.  
prof. Ing. Vladimír Strakoš, DrSc.  
prof. RNDr. Ing. Miloš Šeda, Ph.D.

Zlín, září 2017

© Roman Žák

Vydala **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně** v edici **Doctoral Thesis Summary**.  
Publikace byla vydána v roce 2017

**Klíčová slova:** *Elektroencefalografie (EEG), Rozhraní mozek – počítač (BCI), Emotiv, Mindstorm EV3*

**Key words:** *Electroencephalography (EEG), Brain Computer Interface (BCI), Emotiv, Mindstorm EV3*

Plná verze disertační práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

ISBN 978-80-7454-685-3

## **ABSTRAKT**

Ke snímání elektrických signálů z mozku se používá zařízení využívající výsledky posledních vědeckých výzkumů v oblasti neuro-technologií. Samotná komunikace je zabezpečována bezdrátovým přenosem signálu ze zařízení do počítače, kde dochází k jeho dalšímu zpracování a případnému využití jak při řízení dalších systémů napojených na výpočetní techniku, tak při ovládání softwaru. Komunikační rozhraní mezi mozkem a počítačem je primárním těžištěm této práce.

## **ABSTRACT**

To capture electrical signals from the brain there exists a device that is using the latest results of neuro-technology scientific research. Communication itself is secured by wireless signal transfer from this device to the computer, where it can be further processed and eventually used to manage other systems connected with computer technology and to control the software. The communication interface between the brain and the computer is a main focus of this work.

## OBSAH

ABSTRAKT .....	II
ABSTRACT .....	II
OBSAH.....	III
1. ÚVOD .....	1
2. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....	3
3. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	5
4. TEORETICKÝ RÁMEC .....	6
4.1 Terminologie v oblasti BCI technologii.....	6
4.1.1 Artefakty (Artifacts).....	6
4.1.2 Mozek (Brain).....	6
4.1.3 EEG, Elektroencefalogram (Electroencephalography) .....	6
4.1.4 ECoG, Electrocorticography.....	7
4.1.5 ERP/EP – Event related Potentials / Evoked Potentials.....	7
4.1.6 fMRI, funkční magnetické rezonance a BOLD (blood oxygen level dependent) .....	7
4.1.7 Neuronová síť .....	7
4.1.8 10-20 systémy .....	8
4.2 Historie BCI.....	8
4.2.1 Invazivní BCI.....	9
4.2.2 Částečně invazivní BCI .....	9
4.2.3 Neinvazivní BCI .....	9
4.2.4 Začátky výzkumu.....	10
4.2.5 Technické prostředky BCI.....	10
4.2.6 BCI2000 .....	10
4.2.7 Rehabilitační zařízení .....	11
4.2.8 MoBI (Mobile Brain/Body Imaging) .....	11

5. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ .....	12
6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	13
6.1 Navržení architektury BCI modelu .....	13
6.1.1 Signály vstupu .....	13
6.1.2 Výstupní zařízení .....	14
6.1.3 Propojení vstupu s výstupem .....	14
6.2 Popis řešení .....	15
6.1 Testování BCI v reálných podmínkách .....	19
6.1.1 Testování robota dětmi .....	19
6.1.2 Aplikace 3RO .....	20
6.1.3 Ovládání světla .....	20
6.2 Výsledky .....	21
6.2.1 Nevýhody .....	21
6.2.2 Výhody .....	22
7. PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI .....	23
7.1 Nasazení BCI systémů .....	24
7.2 Možnosti využití .....	24
8. ZÁVĚR .....	26
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	28
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	30
PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA .....	31
ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA .....	33



# 1. ÚVOD

Mozek je velmi složitý systém. „Frontal cortex“ je oblast, která provádí téměř jednu desetinu celkové aktivity mozku, zde jsou zpracovávány všechny vědomé myšlenky a rozhodnutí.

Plánování, modelování svého okolí, interpretace smyslových vstupů až do svého vnímání reality, zpracování paměti a skladování a základní řízení nálad a emocí se vyskytují v mnoha funkčních oblastech rozmístěných po celém mozku včetně „visual cortex“ na zadní straně, „temporal cortex“ po stranách, „parietal cortex“ v horní části mozku a limbického systému hluboko uvnitř mozku. Limbický systém řídí základní nálady a emoce a hlubší kódování dlouhodobé paměti, stejně jako kontrolu základních tělesných funkcí jako je dýchání a srdeční tep.

Většina z těchto hlubších funkcí úzce interaguje s různými částmi mozkové kůry (vnější vrstva, která je přístupná pro měření EEG), avšak interakce je poměrně složitá a distribuovaná. Pro účely mapování správné mozkové činnosti je velmi důležité měření signálů z různých kortikálních struktur nacházejících se po celém povrchu mozku. Není možné, aby tyto signály byly čisté z předních a spánkových oblastí. Stanovení úplného duševního stavu uživatele lze velmi těžce aproximovat.

Při správném pokrytí a uspořádání elektrod je možné rekonstruovat zdrojový model všech důležitých oblastí mozku a vidět jejich souhrn. Obecně platí, že jsou omezeny na určení úrovně vědomí, množství a intenzitu zpracování a (v některých případech) nerovnováhu levé/pravé hemisféry v čelních signálech. Poskytují velmi omezený a nepřesný pohled na stav mysli uživatele.

V rámci prohlubování znalostí o BCI technologiích je nutné se zabývat zejména studiem dosavadních fyziologických poznatků o lidském mozku. Vědecké disciplíny, které je potřeba ve spojitosti s touto prací studovat, jsou zejména početní neurovědy, neuroinformatika a medicína. První ze zmíněných se pokouší o nalezení matematického a biofyzikálního modelu vhodného k modelování základních dějů v neuronech a neuronových sítích. Jedním z hlavních cílů neuroinformatiky je systematicky vyvíjet databáze pro shromažďování dat získaných o mozku (morfologie, anatomie částí mozku a jejich funkční propojení, elektrofyziologie, mozkové stavy získané pomocí magnetické rezonance apod.) a jejich integrace. Dále se snaží vyvinout nástroje pro modelování, kde je cílem se co nejvíce přiblížit emulaci mozkové činnosti.



Přínos medicíny k celkovému poznání mozku je nezpochybnitelný zejména u jeho fyziologické stavby.

Hlubší analýzu mozkových vln je možné provádět pouze tehdy, je-li k dispozici dostatečné množství dat, které byly naměřeny pomocí EEG (elektroencefalografie). Elektroencefalografie je neinvazivní metoda snímání elektrické aktivity mozku, která je získávána prostřednictvím elektrod přiložených na povrch hlavy subjektu. Měří se zprůměrovaná elektrická aktivita skupiny neuronů (milion a více). Medicína tuto technologii využívá k diagnostice epilepsie, poruch spánku apod. V rámci disertační práce bylo zakoupeno zařízení Emotiv EPOC neuroheadset, který EEG využívá ke snímání elektrické aktivity mozku. V průběhu analýzy bude cílem nalézt charakteristické vzory chování mozku na podněty, které by v rámci BCI bylo možné využít při interakci s následnými systémy. Zde je potřeba brát ohled na fakt, že každý jedinec může na stejný podnět reagovat odlišně, i když v současné době již existují takové podněty, u nichž lze hovořit o možnosti univerzálního využití pro většinu obyvatel světa.

## 2. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Propojení centrální nervové soustavy s uměle vytvořeným systémem je hlavní náplní této práce. Výzkum této oblasti vědy začal v roce 1970. Po letech pokusů na zvířatech se první pracovní experimentální implantáty u lidí objevily v roce 1990. Původní myšlenkou bylo navrhnout náhrady a obnovení poškozených částí mozku jako je sluch, zrak a pohyb – čímž se v dnešní době zabývá neuroprotetika. Díky nedávným pokrokům v oblasti technologií se zjistilo, že je možné sestavit systém bez nutnosti přímého spojení s centrální nervovou soustavou. Snímat elektrickou aktivitu neuronů lze například neinvazivní metodou za pomoci elektrod. Průkopnické výzkumy ukazují, že teoreticky jde spíše o rozšiřující lidské funkce než jen o jejich obnovení.

Mnoho laboratoří a vědeckých týmů po celém světě začalo rozvíjet techniky, které se zabývají řízením systémů prostřednictvím aktivity mozku. Tento druh technologie tzn. BCI systém (Obr. 1) je znám jako rozhraní mezi počítačem a mozkem (Pfurtscheller, 2000). Jako jeden z prvních ucelených zdokumentovaných principů celé technologie byla sestavena platforma pod názvem BCI2000 (Schalk, 2004).

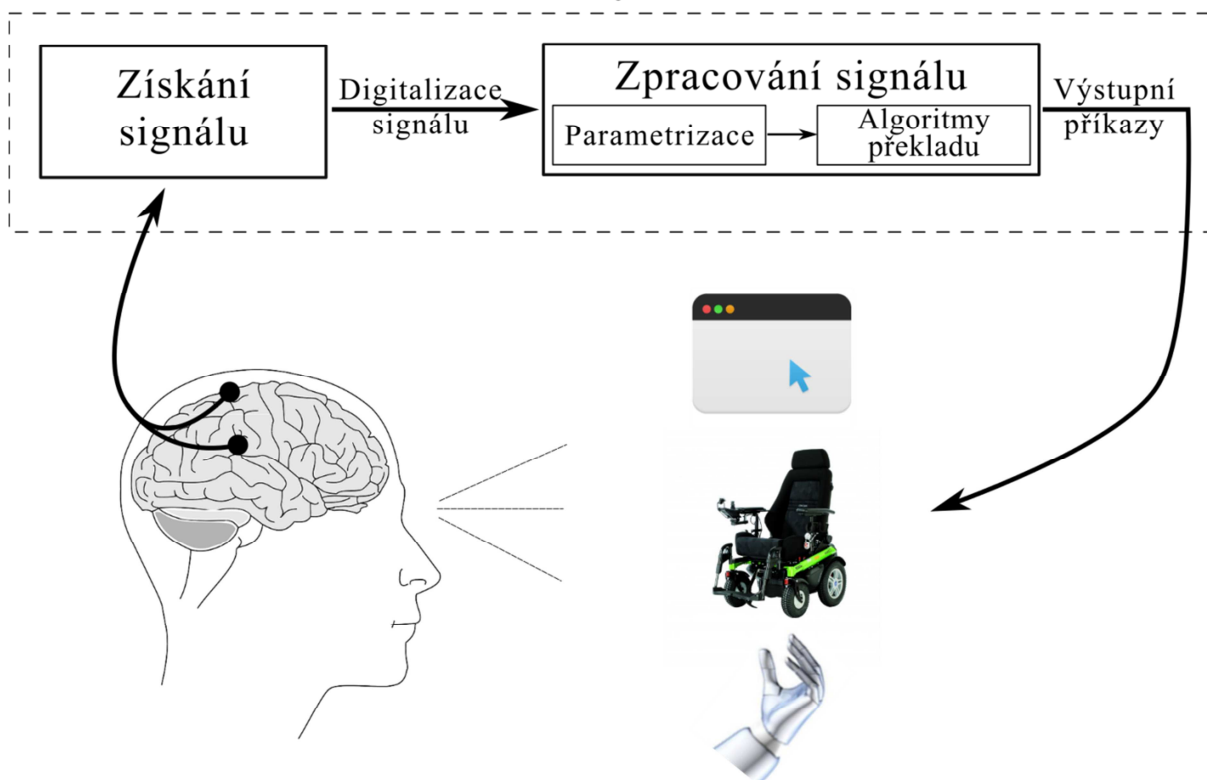
Technologie samotná spadá do několika vědních disciplín. Metod, které měří projevy mozku, je několik (ECoG, EEG, fMRI a BOLD – bude popsáno dále), je tedy zřejmé, že velkou měrou znalosti o mozkové činnosti vycházejí z poznatků medicíny. Dále signály, neboli naměřená data v jakékoliv podobě, mají svou specifickou formu, což spadá do oboru zpracování signálu, fyziky a matematiky. Aby bylo možné rozeznávat dotyčné vzory, musí být zasazeny do problematiky umělé neuronové sítě (Hazrati, 2010; Kaper, 2004; Lotte, 2007). Další klíčovou záležitostí, která nemůže být opomenuta, je komunikační kanál, jež musí být efektivní pro přenos dat. Poslední vědní disciplínou, kterou technologie využívá, je algoritmizace, a to buď softwarů, nebo nasazení zařízení na robotické soustavy.

Cílem celého BCI je výzkum vytvoření nového komunikačního systému, který překládá lidské podněty do řídicích signálů pro výstupní zařízení, jak uvádí skupina mnoha odborníků ve své práci o stavu techniky zpracování signálu a jejich klasifikační metody: The BCI Competition 2003: Progress and Perspectives in Detection and Discrimination of EEG Single Trials (Blankertz, Muller, Curio, Vaughan, Schalk, Wolpaw, Schlogl, Neuper, Pfurtscheller, Hinterberger, Schroder, Birbaumer).

V této specifické oblasti je ve světě poměrně málo řešitelů. Prostřednictvím BCI systémů se měří mozková aktivita, ze které jsou následně odvozeny její specifické vlastnosti, jež jsou dále převedeny na signály vhodné pro ovládání koncového zařízení. Dobrým příkladem je společnost Emotiv, která vyvinula osobní BCI rozhraní pro interakci člověka s počítačem na zmiňovaném principu, které je založeno na zpracování elektromagnetických vln (EEG) z lidského mozku (Emotiv, 2017).

Rozhraní obecně nabízí škálu možných odvětví, ve kterých je možno BCI prakticky využít. Jsou například v komerční sféře – interaktivní aplikace, inteligentní adaptivní prostředí, audio vizuální umění a design, automobilový průmysl, další využití v medicíně, robotice a v neposlední řadě obrovské možnosti ve vědě a výzkumu (Emotiv, 2015; Esfahani, 2011; Fabiani, 2004; Gao, 2003; Guger, 2003; Lal, 2004; Li, 2009; Pozo-Bozos, 2004; Wolpaw, 2003). Výzkumy ukazují, že BCI systémy fungují dobře i v reálném čase pro splnění přísných podmínek za provozu (Guger, 2000 – 2003).

### BCI systém



Obr. 1: Schéma BCI systému. První část: mozková aktivita; druhá část: rozhraní – signal acquisition [získání signálu], digitized signal [digitalizace signálu], signal processing [zpracování signálu], feature extraction [parametrizace], translation algorithm [algoritmy překladu], device commands [výstupní příkazy]; třetí část: aplikace, externí zařízení a komponenty (Wolpaw, 2002)

### 3. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem disertační práce bude zkoumání BCI systémů včetně navržení funkčního modelu a jejich následné otestování. Cílem této práce není vytvořit konkurenční prostředí, ba právě naopak; licence vývoje, která je k dispozici, umožňuje nasadit již zmíněné základní principy dílčích funkčních bloků.

Práce si klade za cíl provést analýzu dalších možností využití technického vybavení nakoupeného v rámci projektů – náhlavní zařízení Emotiv EPOC neuroheadset a robotický systém Mindstorms EV3. Výzkum bude směřován zejména k praktickému uplatnění poznatků získaných v průběhu analýzy. Projekt má dokázat využitelnost BCI na poli vývoje nových aplikací i při interakci s reálnými modely.

V rámci tématu disertační práce je prvním cílem navrhnout vhodnou architekturu uvažovaného BCI modelu, který bude využitelný především v real-time aplikacích. Zde bude nutné zohlednit synchronizaci komunikace mezi vstupem (EEG snímač) a výstupem (robot) tak, aby k odezvě robota na zvolenou aktivitu docházelo v nejkratším možném čase.

Dalším cílem je z navržené architektury vyvinout funkční prototyp, jehož funkcionalita bude následně ověřena řadou testů. Testy budou navrženy tak, aby byly prověřeny reakce výstupního zařízení na předem definované mozkové podněty (pohyby úst, očí, obočí apod.). Cílem testů bude také odhalit reálné parametry navrženého systému s ohledem na jeho potenciální využití v reálném čase.

Cílů bude dosaženo studiem poznatků zkoumané oblasti. Dílčí výsledky budou řádně testovány a odladěny.

Očekává se, že disertační práce ověří platnost následujících předpokladů:

- Je možné navrhnout vlastní model BCI na předem daných požadavcích.
- Navrhovaná architektura poskytuje a splňuje spolehlivou funkcionalitu v reálném čase tak, jak vyplývá z jiných výzkumů.
- V již sestaveném prototypu lze najít další uplatnění se splňujícími podmínkami pro obecný princip BCI.

## **4. TEORETICKÝ RÁMEC**

### **4.1 Terminologie v oblasti BCI technologií.**

Technologie BCI je natolik rozsáhlá, že zahrnuje terminologie ze spousty různých oborů. Co se týče architektury rozhraní mozek – počítač, takřka neexistuje žádný přehled všech termínů a zkratk pro tuto oblast výzkumu, v českém jazyce nevyjímaje. Z tohoto důvodu jsou dále definovány pojmy, které logicky náleží k této technologii.

#### **4.1.1 Artefakty (Artifacts)**

Artefakt je nežádoucí signál v EEG záznamu. Druhy těchto signálů jsou buď tzv. technické artefakty typu EEG síťové rušení, síťový brum, šum přístroje, elektrostatické potenciály nebo biologického charakteru např. svalová aktivita, mrkání očí, dýchání apod. Aby byl signál potlačen, musí být použit specifický filtr z výpočetního hlediska dostatečně rychlý a přesný na to, aby nepoškozoval žádoucí stopu signálu, což do značné míry komplikuje jeho návrh.

#### **4.1.2 Mozek (Brain)**

Mozek je jedna z nejsložitějších struktur v nám známém vesmíru. V tomto kontextu je brán jako nervový organický systém, ne však z pohledu mysli.

K účelu měření existují komerční dostupné přístroje, které umožňují spolehlivé měření signálů. Nejčastější a uživatelsky přívětivá je neinvazivní metoda EEG (více o ní v kapitole 4.2 Historie BCI), další techniky jsou pro úplnost také ve stručnosti uvedeny. Pro větší přesnost je možné tyto metody kombinovat. V celém rozsahu práce bylo ke snímání vybráno zařízení EPOC Emotiv headset, jež má řadu výhod, které již v sobě zahrnují vyřešené elementární zpracování snímaného signálu. Takže s jeho pomocí není již třeba pracovat se surovými daty. Jde jen o to, jak se naměřená data dají použít dále.

Byť je spektrum těchto dat z mozku možné využívat v mnoha a mnoha realizacích, není příliš snadné pochopit veškerý význam celého signálu i za předpokladu, že procento šumu je minimální (Lotte, 2007).

#### **4.1.3 EEG, Elektroencefalogram (Electroencephalography)**

EEG je záznam časové změny elektrického potenciálu způsobeného mozkovou aktivitou. Tento záznam je pořízen standardní neinvazivní metodou elektrické aktivity centrálního nervového systému. Nedostatkem této metody je sumace neuronových signálů. Každá aktivní synapse při vzruchu vyše do prostředí elektromagnetický puls. Hlavním zdrojem EEG je elektrická aktivita

synapto-dendrických membrán v povrchových vrstvách kortexu. Počty těchto pulsů jsou ve vysokých řádech a také jejich lokalizace v rámci celé hlavy není možné zachytit jen několika snímači na pokožce hlavy. Aktivita EEG signálu je zpravidla snímána ve čtyřech základních kanálech: Alpha (8 – 13 Hz), Beta (14 – 30 Hz), Theta (4 – 7,5 Hz), Delta (0,5 – 4 Hz) (Krajča, 2011).

#### **4.1.4 ECoG, Electrocorticography**

Jde o invazivní metodu, kde je jedna z elektrod implantována uvnitř lebky a druhá se nachází zcela mimo mozek. Technologie ECoG (Electrocorticography) používá ke své činnosti elektrody umístěné přímo na obnaženém povrchu mozku. K jejich umístění je vyžadován chirurgický zákrok (kraniotomie). Signál je silnější než u neinvazivních metod a je zároveň méně citlivý na tvorbu zjizvené tkáně (Hiremath et al, 2015).

#### **4.1.5 ERP/EP – Event related Potentials / Evoked Potentials**

ERP (event-related potential) je jakákoli stereotypní elektrofyziologická odpověď na vnitřní nebo vnější podněty. Je to měření odezvy mozku, které je přímým důsledkem procesu myšlení a vnímání (Oostenveld, 2001; Brainproducts.com, 2017).

#### **4.1.6 fMRI, funkční magnetické rezonance a BOLD (blood oxygen level dependent)**

Na základě funkční magnetické rezonance (fMRI) se zaznamenává činnost celého mozku neinvazivně ve vysokém prostorovém rozlišení. Oproti EEG, měří fMRI kyslík v krvi tzv. metoda BOLD (blood oxygen level dependent) a signály jsou korelovány.

Příkladem je nastavení a tok dat u fMRI BCI. Naměřená hemodynamická odezva je zpožděna o přibližně 3 - 6s od neuronové aktivity. Data jsou načítána přes LAN a provádí se předzpracování a statistika analýzy dat. Průběh signálu je exportován do vizualizačního softwaru, který poskytuje zpětnou vazbu subjektu prostřednictvím video vizualizace (Weiskopf, 2004).

#### **4.1.7 Neuronová síť**

Neuronová síť je algoritmus, který napodobuje činnost lidského mozku. Již v dřívějších dobách bylo zjištěno, že mozek je tvořen velkým množstvím vzájemně propletených buněk, které nazýváme neurony, jež spolu komunikují pomocí elektrických impulzů. S neuronovou sítí úzce souvisí pojem umělá inteligence, který výsledky takového snažení někdy více a někdy méně reprezentuje. Princip neuronových sítí je v dnešní době implementován v řadě

dostupných analytických a rozhodovacích softwarů a v různých oborech lidské činnosti podává extrémně dobré výsledky, tedy ve srovnání se „standardními“ typy rozhodovacích algoritmů (StatSoft.cz, 2013).

Neuronové sítě se používají k rozpoznávání signálů, a to při fázi zpracování signálu v modelu BCI2000 je to Signal Processing. Signál již musí být předzpracován tak, aby neuronová síť mohla použít své předdefinované postupy.

#### **4.1.8 10-20 systémy**

Elektrody jsou na hlavě rozmístěny obvykle na standardizovaných pozicích, které jsou dány mezinárodním 10 – 20 systémem (Homan, 1987) nebo jeho modifikací (MCN – Modified Combinatorial Nomenclature) (Oostenveld, 2001), která je určena pro měření podrobnějšího EEG signálu z většího počtu elektrod. Číslice v názvu systému odkazují na fakt, že skutečná vzdálenost mezi sousedními elektrodami je rovna 10% nebo 20% z celkové šířky popřípadě délky lidské lebky. Oba systémy tak přináší metodiku pojmenování pozic jednotlivých elektrod (Interpreting EEG Functional Brain Activity, 2004).

Název pozice je složen ze dvou částí. První část odkazuje pomocí písmen na konkrétní mozkový lalok: F – čelní, T – spánkový, C – centrální, P – parietální a O – týlní. Vzhledem k tomu, že v mozku neexistuje žádný centrální lalok, je nutné dodat, že písmeno C je použito pouze pro identifikační účely. V písmenném označení je dále používáno i písmeno A, které odkazuje na elektrody umístěné na pomyslné středové linii; konkrétně jde o oblast v okolí ušního boltce. Dále jsou definovány i pozice s označením Pg (oblast v okolí nosohltanu) a Fp (oblast v okolí čelní oblasti mozku). Druhá část pak pomocí čísla odkazuje na pozici v pravé/levé hemisféře; sudá čísla (2, 4, 6, 8) označují pozice v pravé hemisféře, zatímco lichá čísla (1, 3, 5, 7) v levé.

## **4.2 Historie BCI**

Historie BCI je velmi rozmanitá a plná zlomových okamžiků. Za celou dobu vývoje BCI vznikly následující tři základní typy BCI systémů: invazivní, částečně invazivní a neinvazivní. Jednotlivé typy se technicky odlišují použitým rozhraním. Každý z nich má své výhody i nevýhody, které předurčují daný typ pro použití na určité kategorie úloh. V následujících podkapitolách jsou jednotlivé typy BCI systémů charakterizovány podrobněji. Pro ilustraci je na Obr. 1 v úvodní kapitole zobrazeno schéma obecného principu BCI systému. K obecnému schématu BCI systému lze v této chvíli poznamenat, že v části

získávání signálu se mohou uplatnit již zmíněné typy rozhraní. Bližší popis systému BCI bude uveden později.

#### **4.2.1 Invazivní BCI**

Invazivní BCI má název podle přímé implementace do šedé kůry mozkové během neurochirurgického zákroku. Tento způsob má výhodu v tom, že signály mají nejlepší kvalitu. Invazivní BCI se zaměřuje na léčby poškozeného zraku. U uvedených zákroků je zvýšené riziko poškození mozkové tkáně, což způsobuje nejen zeslabení signálu, ale také nevratné poškození mozku.

#### **4.2.2 Částečně invazivní BCI**

Částečně invazivní BCI zařízení jsou implantovány dovnitř lebky, ale část snímacího systému se nachází mimo mozek, nikoliv v šedé mozkové hmotě. Produkují daleko kvalitnější signál než neinvazivní metoda, kde kostní tkáň lebky vychýlí a zkreslí signál, a mají menší riziko poškození mozkové tkáně.

Typickým představitelem technologie, která do této kategorie spadá, je ECoG (Elektrokortikografie). V tomto případě se používá stejná technologie jako v případě invazivních systémů s tím rozdílem, že elektrody jsou zapouzdřeny v tenkém plastovém pouzdře, které je zpravidla umístěno nad mozkovou kůrou a zároveň pod tvrdou mozkovou plenou.

#### **4.2.3 Neinvazivní BCI**

Pokusy na lidech byly prováděny i s využitím neinvazivních neurozobrazovacích technologií.

Signály zaznamenané tímto způsobem byly použity pro napájení svalových implantátů a pro obnovení částečné pohyblivosti u experimentálního dobrovolníka. Neinvazivní implantáty se sice snadno používají, ale produkují signál se špatným rozlišením, protože lebka tlumí a rozptyluje elektromagnetické vlny vytvořené neurony. I když mohou být vlny signálu stále detekovány, je obtížnější stanovit oblast mozku, která je zdrojem těchto vln.

Dalším parametrem neinvazivní metody, kterým se výzkum zabýval, je typ měřených vln. Birbaumerův pozdější výzkum s Jonathanem Wolpawem z New York State University se zaměřuje na vývoj technologií, který by umožnil uživatelům vybrat si mozkové signály, zjednodušující ovládání BCI, včetně *mu* a *beta* vln (Kumar, 2008).

Kromě stanovení zdroje a typu měřených vln byl zkoumán i způsob použití zpětné vazby, který je uveden ve studiích signálů P300. Vzory P300 vln jsou



generovány nedobrovolně (stimul-feedback). Když lidé vidí něco, co dovedou rozpoznat, BCI to může umožnit dekodováním kategorií myšlenek, aniž by byl nutný trénink pacientů. Naproti tomu metody biofeedbacku vyžadují výuku v ovládání mozgovými vlnami. Například v roce 2000 prováděla Jessica Bayliss na University of Rochester výzkum, který ukázal, že dobrovolníci byli schopni ovládat prvky z virtuální reality pomocí speciálních přileb pro virtuální realitu s využitím P300 EEG vzorů (např. zapínání a vypínání světel) (Kumar, 2008).

#### **4.2.4 Začátky výzkumu**

Studie, které vyvíjely algoritmy pro rekonstrukci pohybů z motorické kůry (část mozkové kůry zodpovědné za kontrolu pohybu) sahají až do roku 1970. Skupiny vedené Schmidtem, Fetzem a Bakerem v tomto roce zjistily, že se opice rychle naučily kontrolovat mozkovou aktivitu s použitím tréninkové metody trest - odměna.

V roce 1980 Apostoles Georgopoulos v Johns Hopkins Univesity zjistil, že matematický vztah mezi elektrickými odpověďmi jednotlivých motor-cortex neuronů makaků a směrem, kterým opice přesunula své ruce (na základě funkce cosinus). Také zjistil, že rozptýlené skupiny neuronů v různých oblastech mozku kolektivně řídí motorické příkazy. Byl však schopen zaznamenat vzruch neuronů jen v jedné jediné oblasti, protože byl omezen svým technickým vybavením.

Od poloviny devadesátých let došlo k prudkému rozvoji v BCI. Několika skupinám, včetně výzkumné skupiny v čele s Richardem Andersenem, Johnem Donoghuelem, Phillipem Kennedym, Miguelem Nicolelisem a Andrewem Schwartzem, se podařilo zachytit signály mozkových motorických center a použít je k ovládání externích zařízení.

#### **4.2.5 Technické prostředky BCI**

Nejdůležitější součástí architektury BCI systému je samotné rozhraní, které má za úkol na jedné straně měřit elektrický signál mozku a na straně druhé tento signál poskytnout počítači k dalšímu zpracování. Za účelem realizace tohoto rozhraní byla vyvinuta celá řada technických prostředků. Nejvýznamnější z nich jsou představeny v disertační práci.

#### **4.2.6 BCI2000**

BCI systémy začala vyvíjet řada laboratoří, které poskytovaly ovládací a komunikační zařízení pro osoby s těžkým motorickým handicapem. Další pokrok a realizace praktických aplikací závisely na systematickém hodnocení a

porovnávání různých mozkových signálů, technice záznamu signálů, algoritmech zpracování signálů, výstupních formátech a operačních protokolech. Klasické BCI systémy byly vždy navrženy pro konkrétní BCI metodu. Byl vypracován dokument pro platformu výzkumu a vývoje nazvaný BCI2000 (Schalk, 2004), který byl univerzální pro budoucí BCI systémy a mohl zahrnovat jeden nebo více druhů operačních protokolů, metod zpracování signálů, mozkových signálů, výstupních zařízení a aplikací.

Data ukazovala, že tyto systémy fungují dobře i v real-time úlohách a splňují přísné požadavky na provoz. BCI2000 disponuje kompletní dokumentací a je bezplatná pro výzkumné a vzdělávací účely.

#### **4.2.7 Rehabilitační zařízení**

Neurologické stavy jako je cévní mozková příhoda, poranění míchy nebo Parkinsonova nemoc mají často za následek zhoršení motorické kontroly a následné obtíže pacienta vykonávat běžné denní aktivity. Jedním z cílů rehabilitace je podporovat nezávislost pacienta s cílem zpomalit progredující tendence. Roboti mohou dokončovat pohyby bez nutnosti zapojení pacientů, ale bylo prokázáno, že aktivní účast pacienta je velmi důležitá pro zlepšení výsledku rehabilitace (Fabio, 2002).

Jako doplňkové a perspektivní odvětví v rámci rehabilitace a asistence jsou systémy BCI. BCI technologie poskytují prostředky pro přenos kontrolních příkazů přímo z mozku a mohou být použity buď pro přímé ovládání rehabilitačního zařízení nebo poskytovat zpětnou vazbu k pacientovi založené na jeho mozkové aktivitě (Neuromodulace). Jestliže se pacient aktivně zapojí do procesu rehabilitace, pak působí zpětná vazba rehabilitačního zařízení (Ma, 2016).

#### **4.2.8 MoBI (Mobile Brain/Body Imaging)**

Zobrazování lidského mozku během aktivního chování může vysvětlit, jak mozek podporuje přirozené kognitivní procesy, které jsou založeny na využití naší fyzické struktury. Nová zobrazovací metoda MoBI používá elektroencefalografii synchronizovanou se snímáním pohybu a dalších datových toků, které zkoumají mozkovou aktivitu, zatímco se osoby aktivně pohybují a interagují jejich prostředím.

## 5. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

- Pro měření EEG dat byl zvolen Emotiv EPOC z důvodu dobré kompatibility pro širokou škálu programovacích jazyků (např.: C#, Matlab, Java, C++ a další).
- Analýza naměřených dat a jejich zpracování bylo prováděno pomocí softwaru dodaného společností Emotiv.
- Ověření základních vlastností EEG zařízení na předem definovaném množství elementárních úloh v součinnosti s vybranými množinami osob.
- Archivace dat pro další zpracování ve formátu EDF (European Data Format). EDF je standardně používaný formát pro ukládání biologických dat.
- Konektivita mezi vstupním zařízením (Emotiv EPOC) a počítačovým softwarem společně s ověřením latence připojení.
- Syntéza výstupních aplikací a zařízení, které jsou schopny spolehlivě komunikovat v reálném čase.
- Analýza obecných modelů BCI a jejich ověření.

Návrh vlastního modelu BCI, jehož charakteristika bude podrobněji popsána níže. Funkčnost navrženého modelu BCI byla otestována na zvoleném příkladu s robotickou soustavou a vlastních prostředcích.

## **6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST**

V této kapitole je popsán princip vlastního návrhu. Popis je v dalších podkapitolách systematicky rozdělen do logických celků.

### **6.1 Navržení architektury BCI modelu**

Celá architektura je navržena tak, že jsou prostředky kompatibilní mezi sebou, jak už bylo nastíněno v cílech práce. Návrh architektury se opírá o základní model BCI, z něhož vyplývá následující popis principu rozhraní.

Z důvodu odezvy v reálném čase byla zvolena metoda paralelního programování. Programové vlákno označené jako B (Brain) obstarává komunikaci s neuroheadsetem a naslouchá události, která vyhodnocuje a následně vrací diskrétní (například true/false) stavy mozkové činnosti. Analogicky bylo implementováno vlákno C (Computer/device), které sleduje výstupní zařízení. Rutina vlákna spíná akční zásahy na výstupním zařízení v závislosti na stavech, které se předávají mezi obslužnými vlákny B a C. Časové konstanty ve smyčkách byly zvoleny v řádech milisekund, a to v závislosti na konkrétním druhu realizace. V prvotní fázi byly změny signálu otestovány v simulátoru, který komunikuje přes síťový protokol.

#### **6.1.1 Signály vstupu**

Emotiv Epoc sestava umí rozpoznávat následující druhy signálů:

##### **Afektivní signály**

Lidské emoce a stav meditace se v mozku projevují signály, které jsou odborně označovány jako afektivní. Aplikace EmoComposer dokáže simulovat vysílání tohoto druhu signálu. Na druhé straně běží aplikace Emotiv Control Panel, která naopak tyto signály dokáže detekovat. Konkrétní stavy lidské mysli, které odpovídají afektivnímu signálu.

V navrženém modelu BCI nebyl uplatněn žádný z afektivních signálů, dlouhého soustředění; nejsou tudíž vhodné k ovládní externích systému.

##### **Expresivní signály**

Mimika obličeje a pohyb očí patří mezi signály expresivní. Aplikace EmoComposer opět umožňuje simulovat vysílání těchto druhů signálů a Emotiv Control Panel je umožňuje přijímat.

##### **Kognitivní signály**

Kognitivní signály jsou spojené s poznávacími (kognitivními) funkcemi mozku. U kognitivních úloh se v mozku „vytváří“ představy, které je možné namapovat na konkrétní činnost. Uživateli může být zobrazen virtuální předmět, u kterého si uživatel bude představovat, že se má pohybovat vlevo. Takto zformovaná představa pohybu je pak zaznamenána ve formě EEG signálu a přiřazena ke spuštění animace pohybu vlevo. Po tomto „naučení“ může pak aplikace reagovat na naučenou představu pohybu vlevo a v pravém okamžiku přehrát tu správnou animaci. V případě aplikace Emotiv Control Panel je jako virtuální objekt pro účely testování použita kostka. Aplikace EmoComposer opět dokáže simulovat představu pohybu v základních směrech, které následně Emotiv Control Panel dokáže detekovat. Kromě simulovaných signálů umožňuje Emotiv Control Panel využít i možnosti naučení na reálné představy uživatele. Pro tyto účely je v aplikaci využita neuronová síť.

Výše uvedené signály vstupů jsou definovány také v knihovně EmoEngine, která je součástí API poskytovaného výrobcem Emotiv pro další využití ve vědeckých nebo komerčních aplikacích.

### **6.1.2 Výstupní zařízení**

Jako výstupní zařízení byl zvolen Mindstorm EV3. Variabilní robotická stavebnice je kvalitní variabilní řešení, které má všestranné využití právě i pro účely simulací a výzkumné testy. Jádrem hlavní komponenty tzn. Bricku je programovatelný mikropočítač s ARM9 procesorem, na kterém běží Linux. Brick je schopen přijímat vstupy z pole elektrických senzorů a může být spojen s běžným počítačem, a to přes rozhraní USB, Bluetooth a lze také připojit rozšiřující blok pro Wi-Fi přenos. Výstupy posílá na motory, speakery nebo displej, který je součástí této hlavní části. Souprava obsahuje mnoho pasivních a aktivních dílů jako jsou nosníky, ozubená kola, nápravy, čepy a další pohyblivé části. Lze tudíž zkonstruovat důmyslného sofistikovaného robota, který je plně programovatelný na úrovni podpory jazyků C# a Java (Garber, 2013) .

Pro účely disertační práce byl sestaven robotický model a vytvořena programovatelná podpora pro flexibilní přidávání funkcionalit.

### **6.1.3 Propojení vstupu s výstupem**

Vlastní algoritmy překladů obstarává rozhraní, které je realizované třídou Interface. Zdrojové kódy uvedeny v hlavní disertační práci..

## 6.2 Popis řešení

Diagram celého systému je znázorněn na Obr. 2. Celá struktura je navržena tak, aby byla univerzální pro libovolná specifika vstupu. Popis jednotlivých kroků a vazeb:

**Realtime řízení systému BCI** – vstupní bod celé architektury, který je definován požadavky samotného systému např. jaký má účel nebo čeho má systém být schopen dosáhnout vůči svému prostředí, do kterého je zasazen. Musí být schopen pracovat v reálném čase dle specifik BCI2000, aby byl považován za systém tohoto typu.

**Mozková aktivita** – nejdůležitější částí systému je osoba, pro kterou je systém určen. Příkazy a specifika výstupu si uživatel volí podle vlastní potřeby. Každý mozek a tudíž i jeho signály jsou jedinečné. Uživatel by si měl subjektivně definovat chování BCI, protože akce, které fungují pro jeden subjekt, nemusí nutně pracovat u druhého subjektu; proto má uživatel možnost volby mapování, jež bude vysvětleno dále. Subjekt by také měl učinit počáteční inicializaci (viz další bod), která může být provedena „ručně“ nebo pokud z nějakých, například zdravotních, důvodů není subjekt schopen provést inicializaci samostatně, musí být v systému zavedena i závislost na další osobě, která nastavuje a činí spouštění autonomního systému BCI. Ukončení používání systému může být spravováno buď další osobou, anebo lze provést přiřazení akce přímo v BCI systému. Značnou nevýhodou systému je, že mozková aktivita je dobře klasifikovatelná pouze za určitých podmínek, mezi které patří: klidové prostředí a soustředěnost, což však platí obecně pro většinu BCI neinvazivních metod. Další nevýhodou BCI systému je dlouhá a uživatelsky relativně náročná inicializační instalace. Nicméně uživatelé s handicapem, kterým je systém primárně určen, jsou ochotni zmíněné nevýhody akceptovat. Důvodem je, že jim systém může poskytnout obecné rozhraní mezi mozkiem a okolním světem.

**UI prvek BCI vlákna start()** – inicializace a spuštění celého systému. Musí být vybráno vhodné zařízení, na kterém softwarový proces běží a obstarává komunikaci mezi komponentami. Uživatelské rozhraní (UI) indikuje stavy jednotlivých částí, případně může být v jistých aplikacích i skryto pro tzv. „tichý chod na pozadí“.

**Běžící vlákno B** – třída Brain obstarává všechny akce prováděné s náhlavním zařízením. Je nezávislá a může například signalizovat stavy aktivity mozku v daném uživatelském rozhraní.

- Měření signálu – sběr dat z náhlavního zařízení Emotiv.
- Předzpracování – naměřená data a již hotové události obstarává EmoEngine pomocí logické abstraktní funkce v knihovně výzkumné edice edk.dll.

**Běžící vlákno I** – třída Interface je navržena tak, aby byla univerzální. Probíhá v ní přímé propojení mezi vstupem a výstupem.

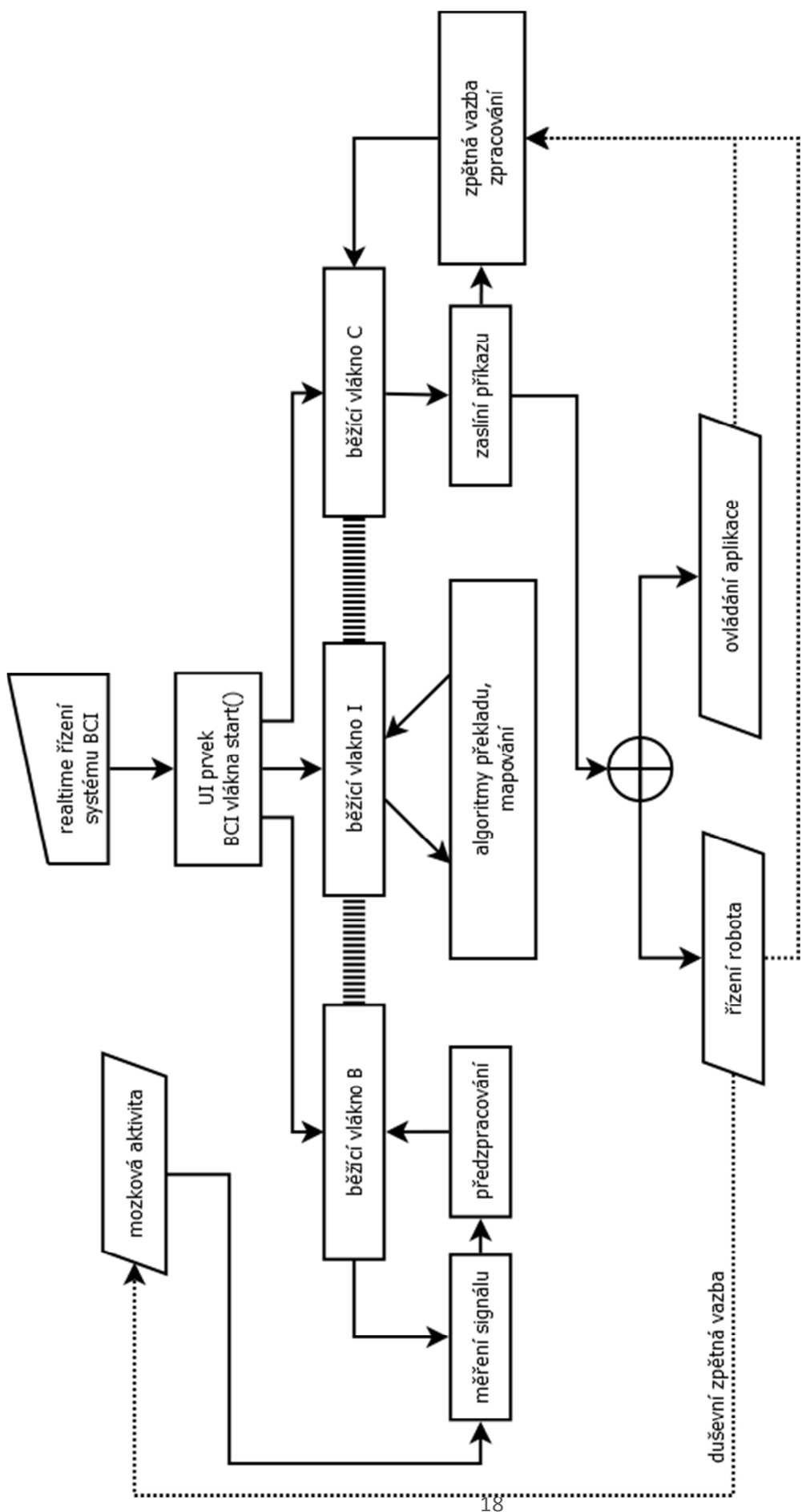
- Algoritmy překladu, mapování – obsahuje podmínky závislé na stavech třídy Brain, které při splnění nebo nesplnění volají metody třídy Computer. Avšak nemusí se nutně volat tyto metody, ale mohou se pouze indikovat a zpracovávat vizuální stavy v UI.

**Běžící vlákno C** – třída Computer, je pojmenována jako „počítač“, ale jen z důvodu terminologie podle druhého písmena zkratky BCI. Nemusí se jednat nutně o počítač jako takový, ale spíše se tím vyjadřují C – CPU řízené soustavy. Opět je i tento objekt nezávislý. Nabízí nespočetné množství realizací, co vše je možné ovládat ať už softwarově či hardwarově.

- Zasílání příkazů – každý ovládaný systém má své specifické podmínky a definice akčních zásahů. Podle nich je, nutné připravit si je tak, aby byly kompatibilní s celým systémem BCI, jelikož se jedná o zařízení či aplikace tzv. třetích stran. V této modelové situaci byla zvolena modifikovatelná robotická soustava, která splňuje real-timové požadavky. Rovněž má robot své vývojové prostředky, který byly použity k implementaci objektu Computer, konkrétně se jedná o využití dynamické knihovny MonoBrick.dll. Knihovna pak komunikuje s mikroprocesorem robota pomocí bezdrátového Bluetooth nebo přes kabel USB a je možné s ní pracovat v programovacím jazyku C#.
- Zpětná vazba zpracování – pro potřeby řízení je také nutné mít u většiny aplikací informaci o stavech koncového zařízení např.: dostupnost, konektivita nebo i další mechanismy ovlivňující celý systém jako jsou využití různých senzorů. U robotické soustavy se dá využít IR senzor, který může detekovat kolizi či vzdálenost od

překážky nebo využití gyroskopu a hodnot z něj. U ovládání softwarového řešení to může být detekce dostupnosti systémových příkazů apod. Proto musí být celý objekt C samostatný, aby řešil správu a vyhodnocování autonomně. Vlákno Interface může opět zobrazit indikaci stavů v UI.





Obr. 2: Diagram funkčního modelu BCI

**Řízení robota** – hardwarová řešení. Pro modelovou situaci byl sestaven robot s motorovými pohony kol a senzory. Obecně se však jedná o řízenou fyzickou soustavu.

**Ovládání aplikace** – softwarová řešení.

**Duševní zpětná vazba** – tato vazba vyjadřuje, že jde obecně o tzv. uzavřenou smyčku BCI. Subjekt má přímý (vizuální či jiný smyslový) vjem s ovládanou soustavou a je toho součástí.

## **6.1 Testování BCI v reálných podmínkách**

Výše popsaná architektura byla vyzkoušena v reálných podmínkách během výzkumu aktivizace mozkových center. Každá dílčí realizace má jiné nároky a požadavky, nicméně navrženou strukturu BCI, jak byla vymyšlena, se povedlo řádně otestovat a zdokumentovat. Každý test otevřel řadu dalších otázek a možností, kam výzkum posunout. Nicméně se objevilo i několik nedostatků, které budou popsány níže.

### **6.1.1 Testování robota dětmi**

Neboť dlouhodobým cílem výzkumu je nasazení těchto systémů do prostředí, kde by pomáhaly lidem s různým handicapem, byla pro účely testování zvolena Základní škola Zlín, Středová, která je jediným zařízením svého typu na Zlínsku. Jejich žáky jsou děti s mentální retardací různého stupně a s dalším postižením, ať již tělesným či smyslovým. Většina dětí je imobilních, ale mají i žáky nevidomé a žáky s poruchou autistického spektra.

Pro děti se testování systému stalo zpestřením dne a pro ověření funkčnosti vhodnou zátěžovou zkouškou, protože v reálných podmínkách je spoustu rušivých elementů, navíc přimět děti k soustředěným stavům mysli je také těžší než samotné testování. Proto byli vybráni jedinci, pro které je testovaný systém primárně určen, tedy:

- Imobilní s tělesným handicapem.
- S poruchou komunikace.
- Mentálně vyspělejší, aby si uvědomovali nejen, co se po nich chce, ale také uvědomění toho, že existuje možnost usnadnění ku prospěchu svému.

Je nutné dodat, že tyto tři indispozice nejsou zastoupeny u jedince samostatně, ale je zde obvykle jejich kombinace.

Při samotném testování systému se ukázalo, že systém jako takový je v reálném čase relativně funkční. Avšak za těchto podmínek se stává nepříliš použitelný pro praktické účely, a to zejména pokud by byl určen jako kompenzační pomůcka při vzdělávání. Dá se však nasadit individuálně třeba v prostředí, kde jsou dítě nebo osoba schopny se soustředit.

### **6.1.2 Aplikace 3RO**

Návrh architektury byl použit k diplomové práci: Řízení externích malých robotických systémů pomocí EEG signálů, 2016. V tomto BCI byla navržena aplikace 3RO, u které byla ověřena funkčnost v prostorách Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Testování bylo zdokumentováno videozáznamem. Autor této disertační práce byl přímým konzultantem diplomové práce. Programování BCI 3RO ještě nevyužívá zcela myšlenku paralelního přístupu, nicméně aplikace byla ověřena jako funkční, proto bylo hledáno další rozšíření a univerzálnost, které je v práci popsáno jako paralelní přístup architektury BCI.

### **6.1.3 Ovládání světel**

Systém může ovládat také jiné zařízení než je robot. Handicapované osoby mají různé potřeby, které jsou výrazně odlišné od potřeb intaktních lidí. Těmto lidem se pak problémy handicapovaných zdají až příliš triviální a nedokážou si tudíž představit jak výraznou pomoc může jakkoliv jednoduchá aplikace představovat.

Příkladem z praxe, který do těchto úloh spadá, je využití pro rozsvěcování světel. Byla pořízena „Reléová karta 8nás. Conrad, 212 x 100 x 29 mm, 23 V/AC, 16 A (modul)“. Kably k jednotlivým spínačům světel byly vpraveny přímo do zdi. Karta je připojena přes USB k počítači. Samotné nízko-úrovňové naprogramování je realizováno pro každé světlo.

Na Obr. 3 je ukázka grafické uživatelské rozhraní aplikace, které slouží pro indikace stavu světel. Aplikace běží permanentně v pozadí operačního systému jako rezidentní. Nebylo cílem udělat jen řízení světel pomocí mozkové aktivity, přece jen je nepraktické mít náhlavní zařízení neustále na hlavě. Šlo o ověření univerzálního řešení BCI. Samotná aplikace je využívána plně autonomně, tak že je doba zapnutí jednoho (nastavitelného světla) na západ slunce. Sepínání je možné buď za pomoci Emotivu nebo ručně klávesovou zkratkou, kterou zachytává aplikace. Možnost rozšíření je na detekce hlasu nebo snímání světelných podmínek webovou kamerou.



*Obr. 3: Indikace tří světel, první zleva hlavní stropní, uprostřed nad postelí, třetí světlo nad částí místnosti.*

## **6.2 Výsledky**

Během výzkumu bylo nutné se zaměřit na kritické body řešení, kterými jsou chyby měření, citlivost a okolní vlivy prostředí u řízeného modelu. Chyby měření náhlavního přístroje mohou vznikat zejména kvůli přítomnosti nežádoucích vstupů (artefaktů), na které lidský mozek reaguje a tím je ovlivněn i samotný průběh měřených signálů. Samotná reakce mozku na tyto podněty je pochopitelně neovlivnitelná, takže je potřeba s tímto problémem počítat. Díky tomu mohou vznikat mylné podněty pro řízení mozkovou aktivitou. Při samotném snímání mozkové aktivity je také nutné počítat s vysokou citlivostí použitého zařízení, která se projevuje zejména při prudkých pohybech hlavy.

Na základě testů a pozorování byly stanoveny následující pozitivní a negativní výsledky, které jsou zobecněny na celý popisovaný model BCI.

### **6.2.1 Nevýhody**

Obecně jsou v BCI systémech i nežádoucí vlastnosti, plynoucí z nestacionárního biologického signálu EEG:

- Kalibrace – instalace měřící helmy trvá řádově minuty, každý kontakt se musí navlhčit slaným roztokem pro dobrou vodivost. Jednotlivé senzory se musí umístit do pozic 10 – 20 systému. Musí se ověřit konektivita jak se vstupem, tak i s výstupem. Každý uživatel má své unikátní potřeby, které je nutné brát v úvahu, proto se u každého může nastavit citlivost např. konstanta rychlosti motoru. Nevýhodou jsou také delší či husté vlasy. Tuto skutečnost neuvádí téměř žádná publikace o BCI, ale přitom toto nemůže být v reálné praxi zanedbáno.
- Jedinečnost subjektu – u každého je spolehlivost ovladatelnosti systému jiná i za předpokladu klidového stavu. Nedá se objektivně zjistit procentuální úspěšnost.

- Rušivé prostředí – okolní vlivy se projevují prostřednictvím lidských smyslových vjemů do EEG jako nežádoucí artefakty.

### 6.2.2 Výhody

Jak se ukázalo, systém vykazuje vlastnosti pro další možné využití, protože bylo ověřeno, že je přínosné v mnoha ohledech:

- Variabilita - největší výhodou je a také na to byl kladen důraz, modifikovatelnost mapování vstupů na výstup. V poměrně relativně krátkém čase lze přiřazovat podle specifik uživatele funkčnost Brain Computer Interface. Již nadefinovaný systém pracuje spolehlivě bez zásahu další osoby. Je také nutné dodat, že jádro navrženého systému běží na PC, nicméně je žádoucí s rostoucí technickou a výpočetní dobou mít na paměti přepis a kompilaci i na jiných zařízeních, jež budou můstkem mezi náhlavním zařízením a řízenou soustavou. Takže aplikace může být realizována i multiplatformně.
- Real-time odezva - v dnešní době již je překonaná reakční doba mezi mozkovou aktivitou a akčními zásahy díky dostatečným výkonům CPU a návrhem v paralelním zpracování. Časové zpoždění všech tří vláken je synchronizováno na stejný čas v řádech desítek ms, což se ukázalo jako dostačující s ohledem na plynulou bezdrátovou komunikaci mezi náhlavním zařízením a výstupním hardwarem. Pokud systém například využívá zpětné vazby jiného výstupu např. gyroskop, je nutné u příslušného senzoru brát ohled na nezávislé zpoždění 550ms. Každý systém má svá specifika časových konstant, která však zásadně nezpomalují celou soustavu, ale jen dílčí akce ovládání.
- Neinvazivní metoda – snadné měření signálů v reálných podmínkách a její manipulace je přínosná pro celý systém.
- Dostupnost – jak bylo navrženo a odzkoušeno, je systém BCI již dostupný nejen z ekonomického hlediska, ale i z pohledu informačních technologií jsou komponenty k dispozici i pro širokou veřejnost. Je čím dál snazší realizovat a kombinovat různé technologie dohromady.

## 7. PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

Na základně zkoumané problematiky byl vytvořen vlastní model, který byl ověřen a posouzen jako technologie, která má budoucnost v mnoha směrech využití. Nabízí spoustu nových možností a zlepšení, která mohou být dále zkoumána. Vylepšení jsou zřejmá ve dvou zásadních směrech modelu BCI:

- Měření signálu – vychází z fyzikálních zákonů a řeší jak nejlépe měřit sumaci elektromagnetických vln, jak zvolit vhodný materiál pro senzory a také jaké jsou možnosti nastavení citlivosti. Důležitá je i volba technologie, která by měla být nejen kompaktní a uživatelsky snadno instalovatelná na hlavu subjektu, ale také dostatečně přesná. Lze tvrdit, že nelze stále hledat takováto zlepšení, protože jsme limitováni právě fyzikálními zákony a na nich závislými omezeními biologických charakteristik EEG signálů, které i sebelepší měřící technika není schopna překonat. V případě EEG signálu je technologie měření odkázána pouze na měření sumace elektrické aktivity velké skupiny neuronů.
- Identifikace mozkových akcí – zpracování signálů je na přijatelné a vypovídající úrovni. Avšak abychom mohli rozpoznávat příslušné vědomé reakce mozku v signálu, který obsahuje spousty vedlejších artefaktů a biologických složek, je nutné lépe pochopit zákonitosti mozku. Na identifikaci se používají umělé neuronové sítě, což jsou algoritmy, které samy o sobě jsou ve fázi permanentního zkoumání. Nalezení a vyzkoušení těchto algoritmických principů je téma k dalšímu výzkumu nejen na poli BCI.

Jak bylo zmíněno v předešlé kapitole, má BCI několik nežádoucích vlastností, které před nasazením do reálného prostředí nemohou být podceňovány. V první řadě samotná kalibrace může zabírat až několik desítek minut, což se může v některých realizacích brát jako velká překážka. Je nutné si však uvědomit, že pro cílovou skupinu, které je rozhraní určeno, je tento čas v konečném důsledku irelevantní, neboť jim má přinést mnohá usnadnění.

S tím souvisí i další zmínka o nežádoucím rušivém prostředí a i zde platí, že pokud bude aplikace směřována do klidového prostředí se smyslem pomoci uživateli, stává se systém žádoucí a prospěšný.

## 7.1 Nasazení BCI systémů

System je možné využít různým způsobem za jistých podmínek v daném prostředí. Je nutné si definovat, co se od systému očekává a zda neexistují jiné alternativy. Především se očekává, že uživatel, pro kterého je BCI určeno, je dobře seznámen s touto technologií, přičemž nemusí znát technické detaily. Než se daný systém začne používat, měl by proběhnout test všech požadavků, které jsou detailně popsány v disertační práci.

## 7.2 Možnosti využití

Je celá řada možností kam BCI nasadit nebo na čem jej testovat. BCI mají dva směry rozvoje. První je pomoc handicapovaným osobám (na tuto oblast se práce zaměřuje). Druhým směrem je odvětví zábavního průmyslu.

**Usnadnění ovládání domácnosti** – kromě ovládání světel existují i další možnosti využití. Na příkladu světel se ukázalo, že je to možné, proč by tedy hardware nemohl ovládat i jinou komponentu v domácím prostředí např.: rolety u oken, polohování postele, ovládání televizoru aj.

**Mobilní aplikace** – z teorie vyplývá, že se upouští od tradičního měření EEG jen v klidových podmínkách, jak ukazuje technologie MoBi, která naopak monitoruje mozek při aktivních činnostech. Dalším předmětem výzkumu může být implementace do přenositelných zařízení, jako jsou tablety a mobilní telefony.

**Sociální sítě** – osoby s indispozicí pohybu v kombinaci s poruchou komunikace mají bariéru právě při interakci s okolním světem. Usnadnění práce a správné mapování na povely ve virtuálních internetových sociálních sítích je hudbou budoucnosti, ale jak tato práce ukazuje, technologicky to možné je.

**Brain Art** – snadnější sekundární snahou je vyvinout další zajímavé aplikace určené ke kreativním účelům. I krása, umění, kultura a různé druhy zábavních činností jsou součástí lidského života. Aplikace založené na audio-vizuálních interagujících prostředích především motivují a odreagovávají od všední reality. Něco podobného se již ve světě vědcům povedlo, a to s výstupem audio melodie. Předpokládalo se, že půjde o směs šumu a neposlouchatelných kombinací zvuků, ale opak byl pravdou. Vznikla poslouchatelná melodie, kterou tvořilo několik mozků v kolektivu (jednalo se také o subjekty imobilní). To se stalo inspirací a již v rámci disertace byl, na základě dosavadního výzkumu, rozpracován návrh, který řeší zobrazení emočních stavů do obrazů, které nejen mohou být animovány, ale také ukládány na plátno virtuálního obrazu. Takto

vytvořený obraz může být vytištěn jako hodnotné umění „emoce mého mozku“. Myšlenka šla ještě dál, a to na úroveň rozšíření obrazu o další rozměr, tedy vytištění libovolné plastiky na 3D tiskárně.



## 8. ZÁVĚR

Disertační práce se zabývá zkoumáním řízení systémů pomocí mozkové aktivity.

Lidský mozek je asi nejznámějším adeptem na nejsložitěji fungující systém v námi objeveném známém vesmíru, proto je přirozené se zabývat tím, jak pracuje a jak je možno jeho potenciál využít pro usnadnění bytí. Zdravý mozek nemusí mít od svého vzniku vždy k dispozici fungující prostředky k interakci s okolním světem. Pokud je poškozena tělesná schránka, můžeme se pokusit o kompenzaci vytvořením umělého rozhraní, prozatím ne zcela dokonale, prostřednictvím spojení mozek-počítač-prostředí. Vytvoření takového propojení je primárním cílem celé práce o technologii BCI.

V úvodu byl představen nástin souvislostí tématu v dané oblasti. Byla shrnuta historická fakta a popis stávajících výzkumů a poznatků o BCI obecně. Směr, kterým se práce ubírá, je patrný z teoretické části, která popisuje principy modelu BCI. Zmiňované rozhraní (I), jež komunikuje mezi mozkem (B) a počítačem (C), je již vlastním návrhem architektury. Odvození dílčích principů od již známých řešení je nutným předpokladem k dalším realizacím ve zmíněném oboru, proto také bylo klíčovým základem práce hledání literární rešerše z dostupných relevantní zdrojů.

Práce si kladla za cíl provést analýzu dalších možností využití technického vybavení nakoupeného v rámci projektů – náhlavní zařízení Emotiv EPOC neuroheadset a robotický systém Mindstorms EV3.

Prvním cílem bylo navrhnout vhodnou architekturu BCI modelu, který bude využitelný především v real-time aplikacích. Zde bylo nutné zohlednit synchronizaci komunikace mezi vstupem (EEG snímač) a výstupem (robot) tak, aby k odezvě robota na zvolenou aktivitu docházelo v nejkratším možném čase.

Dalším cílem bylo z navržené architektury vyvinout funkční prototyp, jehož funkcionality bude následně ověřena řadou testů. Testy byly navrženy tak, aby byly prověřeny reakce výstupního zařízení na předem definované mozkové podněty (pohyby úst, očí, obočí apod.). Cílem testů bylo také odhalit reálné parametry navrženého systému s ohledem na jeho potenciální využití v reálném čase.

Pomocí navržené architektury lze univerzálně mapovat nejen řídicí akce pro hardwarové platformy, ale i příkazy operačního systému či systémové zkratky bez nutnosti uživatelského prostředí. Pokud to bude možné, tak by bylo dalším

budoucím řešením nasazení komplexního BCI rozhraní do oboru robotiky, ovládání RC modelů, externích zařízení či ovládání softwaru.

Důvodem výzkumu je snaha ovládání umělých technických zařízení pomocí lidského mozku, což je dlouhodobá vize tohoto výzkumu. Uplatnění jakéhokoliv dílčího poznání nebo realizace má svá opodstatnění - téměř žádné národní zázemí v tomto druhu výzkumu BCI není (důkazem toho jsou zdroje, které nejsou popsány v českém jazyce), z čehož plyne obrovský potenciál do praktičnosti využití. Dalším faktem je, že se v průběhu řešení ukázaly další myšlenky, směry a nové nápady, které jsou natolik jedinečné, že by stálo zato se jim dále věnovat, ale jejich realizovatelnost je spojená s vysokou časovou náročností.

# SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

BLANKERTZ, B., K.-R. MULLER, G. CURIO, T.M. VAUGHAN, G. SCHALK, J.R. WOLPAW, A. SCHLOGL, C. NEUPER, G. PFURTSCHELLER, T. HINTERBERGER, M. SCHRODER a N. BIRBAUMER. The BCI Competition 2003: Progress and Perspectives in Detection and Discrimination of EEG Single Trials. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2004, vol. 51, iss. 6, s. 1044-1051 DOI: 10.1109/tbme.2004.826692.

Brain Products GmbH - Solutions for neurophysiological research [online]. © 2017 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://www.brainproducts.com/>.

EMOTIV.Emotiv | EEG System | Electroencephalography [online]. © 2017 [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: <http://www.emotiv.com/>.

ESFAHANI, Ehsan Tarkesh a V. SUNDARARAJAN. Classification of primitive shapes using brain–computer interfaces. *Computer-Aided Design*. 2012, vol. 44, iss. 10, s. 1011-1019. DOI: 10.1016/j.cad.2011.04.008.

FABIANI, G.E., D.J. MCFARLAND, J.R. WOLPAW a G. PFURTSCHELLER. Conversion of EEG Activity Into Cursor Movement by a Brain–Computer Interface (BCI). *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2004, vol. 12, iss. 3, s. 331-338. DOI: 10.1109/tnsre.2004.834627.

FABIO, Babiloni, Femke NIJBOER a Ursula BROERMANN. Brain Computer Interfaces for communication and control. *Frontiers in Neuroscience*. 2002, vol. 4, s. 185-201. DOI: 10.1007/978-3-642-02091-9\_11.

GAO, Xiaorong, Dingfeng XU, Ming CHENG a Shangkai GAO. A bci-based environmental controller for the motion-disabled. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2003, vol. 11, iss. 2, s. 137-140. DOI: 10.1109/tnsre.2003.814449.

GARBER, Gary. Instant LEGO Mindstorm EV3 your guide to building and programming your very own advanced robot using LEGO Mindstorm EV3. Birmingham, UK: Packt Pub, 2013. ISBN 9781849519748.

GUGER, C., A. SCHLOGL, C. NEUPER, D. WALTERSPACHER, T. STREIN a G. PFURTSCHELLER. Rapid prototyping of an EEG-based brain-computer interface (BCI). *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2001, vol. 9, iss. 1, s. 49-58. DOI: 10.1109/7333.918276.

GUGER, C., G. EDLINGER, W. HARKAM, I. NIEDERMAYER a G. PFURTSCHELLER. How many people are able to operate an eeg-based brain-computer interface (bci)?. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2003, vol. 11, iss. 2, s. 145-147. DOI: 10.1109/tnsre.2003.814481.

GUGER, C., H. RAMOSER a G. PFURTSCHELLER. Real-time EEG analysis with subject-specific spatial patterns for a brain-computer interface (BCI). *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*. 2000, vol. 8, iss. 4, s. 447-456. DOI: 10.1109/86.895947.

HAZRATI, Mehrnaz Kh. a Abbas ERFANIAN. An online EEG-based brain–computer interface for controlling hand grasp using an adaptive probabilistic neural network. *Medical Engineering & Physics*. 2010, vol. 32, iss. 7, s. 730-739. DOI: 10.1016/j.medengphy.2010.04.016.

HIREMATH, Shivayogi V., et al. Brain computer interface learning for systems based on electrocorticography and intracortical microelectrode arrays. *Frontiers in integrative neuroscience*. 2015, vol. 9.

HOMAN, Richard W, John HERMAN a Phillip PURDY. Cerebral location of international 10–20 system electrode placement. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*. 1987, vol. 66, iss. 4, s. 376-382. DOI: 10.1016/0013-4694(87)90206-9. ISSN 00134694.

Interpreting EEG Functional Brain Activity. *FIU* [online]. 2004 [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: <https://cate.fiu.edu/sites/default/files/Publications/01266932.pdf>

KAPER, M., P. MEINICKE, U. GROSSEKATHOEFER, T. LINGNER a H. RITTER. BCI Competition 2003—Data Set IIB: Support Vector Machines for the P300 Speller Paradigm. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2004, vol. 51, iss. 6, s. 1073-1076. DOI: 10.1109/tbme.2004.826698.

KRAJČA, V., Jitka Mohylová. Číslíkové zpracování neurofyzilogických signálů. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 9788001047217.

KUMAR, Nitish. BRAIN COMPUTER INTERFACE. In: Digital Library CUSAT [online]. 2008 [cit. 2016-01-13]. Dostupné z: <http://dspace.cusat.ac.in/jspui/bitstream/123456789/2621/1/Brain%20computer%20interface.pdf>

LAL, T.N., M. SCHRODER, T. HINTERBERGER, J. WESTON, M. BOGDAN, N. BIRBAUMER a B. SCHOLKOPF. Support Vector Channel Selection in BCI. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2004, vol. 51, iss. 6, s. 1003-1010. DOI: 10.1109/tbme.2004.827827.

LI, Mu a Bao-Liang LU. Emotion classification based on gamma-band EEG. *2009 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. 2009. DOI: 10.1109/iembs.2009.5334139.

LOTTE, F, M CONGEDO, A LÉCUYER, F LAMARCHE a B ARNALDI. A review of classification algorithms for EEG-based brain-computer interfaces. *Journal of Neural Engineerin*. 2007, vol. 4, iss. 2, R1-R13. DOI: 10.1088/1741-2560/4/2/r01.

OOSTENVELD, Robert a Peter PRAAMSTRA. The five percent electrode system for high-resolution EEG and ERP measurements. *Clinical Neurophysiology*. 2001, vol. 112, iss. 4, s. 713-719. DOI: 10.1016/S1388-2457(00)00527-7. ISSN 13882457.

POZO-BANOS, Marcos Del, Jesús B. ALONSO, Jaime R. TICAY-RIVAS a Carlos M. TRAVIESO. Electroencephalogram subject identification: A review. *Expert Systems with Applications*. 2014, vol. 41, iss. 15, s. 6537-6554. DOI: 10.1016/j.eswa.2014.05.013.

PFURTSCHELLER, G., C. NEUPER, C. GUGER, W. HARKAM, H. RAMOSER, A. SCHLOGL, B. OBERMAIER, M. PREGENZER, Christoph GUGER a Brendan Z. ALLISON. Current trends in Graz brain-computer interface (BCI) research. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*. 2000, vol. 8, iss. 2, s. 133-137. DOI: 10.1007/978-3-319-09979-8\_11.

SCHALK, G., D.J. MCFARLAND, T. HINTERBERGER, N. BIRBAUMER a J.R. WOLPAW. BCI2000: A General-Purpose Brain-Computer Interface (BCI) System. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2004, vol. 51, iss. 6, s. 1034-1043. DOI: 10.1109/tbme.2004.827072.

StatSoft.cz. *Úvod do neuronových sítí* [online]. © 2013 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: [http://www.statsoft.cz/file1/PDF/newsletter/2013\\_02\\_05\\_StatSoft\\_Neuronove\\_site\\_linky.pdf](http://www.statsoft.cz/file1/PDF/newsletter/2013_02_05_StatSoft_Neuronove_site_linky.pdf).

WEISKOPF, N., K. MATHIAK, S.W. BOCK, F. SCHARNOWSKI, R. VEIT, W. GRODD, R. GOEBEL a N. BIRBAUMER. Principles of a Brain-Computer Interface (BCI) Based on Real-Time Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI). *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2004, vol. 51, iss. 6, s. 966-970. DOI: 10.1109/tbme.2004.827063.

WOLPAW, J.R., D.J. MCFARLAND, T.M. VAUGHAN a G. SCHALK. The wadsworth center brain-computer interface (bci) research and development program. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2003, vol. 11, iss. 2, s. 204-207. DOI: 10.1109/tnsre.2003.814442.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ADC	Analog-to-Digital Converter
API	Application Programming Interface
BOLD	Blood Oxygen Level Dependent
BCI	Brain – Computer Interface
CAD	Computer Aided Design
CPU	Central Processing Unit
ECoG	Electrocorticography
EDF	European Data Format
EEG	Elektroencefalografie / Elektroencefalogram
ERP/EP	Event related Potentials / Evoked Potentials
fMRI	Functional Magnetic Resonance Imaging
IR	Infrared Radiation
LAN	Local Area Network
MCN	Modiffied Combinatorial Nomenclature
MEG	Magnetoencephalography
MoBi	Mobile Brain/Body Imaging
NIRS	Near-infrared Spectroscopy
RC	Remote Control
SDK	Software Development Kit
TTL	Time to live
UI	User Interface
USB	Universal Serial Bus

## PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA

SVEJDA, Jaromir, Roman ZAK a Roman JASEK. Zpracování mozkové aktivity v bci systémech. *Odborný vědecký časopis Trilobit*. 2012, č. 1. ISSN 1804-1795.

SVEJDA, Jaromir, Roman ZAK a Roman JASEK. Systémy identifikace vstupu a biometrické systémy. *Odborný vědecký časopis Trilobit*. 2012, č. 2. ISSN 1804-1795.

POKORNY, Pavel, Roman ZAK a Jaromir SVEJDA. The Design and Realization of Ascii Art Software. *Advances in Sensors, Signals, Visualization, Imaging and Simulation. Sliema : WSEAS*. 2012, s. 159-162. ISSN 1790-5117. ISBN 978-1-61804-119-7.

PLUHACEK, Michal, Jaromir SVEJDA, Hana TALANDOVA, Roman ZAK a Roman JASEK. Artificial intelligence in biometrical identification systems. *Bezpečnostní technologie, Systémy a Management 2013: Sborník příspěvků 4. mezinárodní konference*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Fakulta aplikované informatiky, 2013, s. 5. ISBN 978-80-7454-289-3

SVEJDA, Jaromir, Roman ZAK, Roman JASEK a Roman SENKERIK. On the Simulation of the Brain Activity: A Brief Survey. *Modern Trends and Techniques in Computer Science*. Springer, Cham, 2014, s. 105-115.

ZAK, Roman, Jaromir SVEJDA, Roman SENKERIK a Roman JASEK. Analysis of EEG signal for using in biometrical classification. *ECMS*. 2014, s. 377-381.

SVEJDA, Jaromir, Roman ZAK, Roman SENKERIK a Roman JASEK. Complex Analysis of EEG Signal for Biometrical Classification Purposes. *Nostradamus 2014: Prediction, Modeling and Analysis of Complex Systems*. Springer, Cham, 2014, s. 449-459.

JASEK, Roman, Lukas KRALIK, Jaromir SVEJDA a Alena KOLCAVOVA. Differences between ITIL® V2 and ITIL® V3 with Respect to Service Strategy and Service Design. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, 2015, s. 550016.

SVEJDA, Jaromir, ZAK, Roman a Roman JASEK. Concept of software interface for BCI systems. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, 2016, s. 120022.

ZAK, Roman, Jaromir SVEJDA, Roman JASEK a Roman SENKERIK. The Architecture of Software Interface for BCI System. *Intelligent Systems in Cybernetics and Automation Theory*. Springer, Cham, 2015, s. 307-316.

SVEJDA, Jaromir, Roman ZAK, Roman SENKERIK a Roman JASEK. Using brain - Computer interface for control robot movement. *ECMS*. 2015, s. 475-480.

ŠAUR, David, Roman ŽÁK a Jaromír ŠVEJDA. Data Mining from Radar Precipitation Measurement of the CZRAD Network. 19. *International Conference on Systems (CSCC '15), Special Session: Informatics in Control Theory and its Applications – Control Applications. Recent Advances in Systems*. Zakynthos Island, Greece, July 16-20, 2015, s. 280-285. ISBN: 978-1-61804-321-4. ISSN: 1790-5117

SVEJDA, Jaromir, Roman ZAK, Roman SENKERIK a Roman JASEK. Research on Processing the Brain Activity in BCI System. *Pattern Recognition and Classification in Time Series Data*. IGI Global, 2016. s. 152-178.

# ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA

OSOBNÍ ÚDAJE Žák Roman



📍 Papírenská 253,  
76311 Želechovice nad Dřevnicí (Česká republika)

✉️ rzak@fai.utb.cz

Pohlaví Muž | Datum narození 6. 12. 1983 | Státní příslušnost/i  
Česká republika

## PRACOVNÍ ZKUŠENOSTI

- 2015 – dosud Programátor  
GEMINI oční klinika a.s., Zlín (Česká republika)
- 2014 – 2015 IT specialista  
RISING creative studio s.r.o., Zlín (Česká republika)
- 2011 – 2014 Pedagogická činnost  
Vedení kurzů v rámci výuky na Fakultě aplikované informatiky  
Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, Zlín (Česká republika)

## VZDĚLÁNÍ, ODBORNÁ PŘÍPRAVA A KURZY

- 2014 University of Algarve, Faro (Portugalsko), studijní stáž
- 2009–2011 Vysokoškolské vzdělání v oboru: Informační technologie (Ing.)  
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky
- 2006–2009 Vysokoškolské vzdělání v oboru: Informační technologie (Bc.)  
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky



2002–2006 Středoškolské vzdělání  
Střední průmyslová škola Zlín, Ekonomické lyceum

## OSOBNÍ DOVEDNOSTI

Mateřský jazyk Čeština

Další jazyky	POROZUMĚNÍ		MLUVENÍ		PÍSEMNÝ PROJEV
	Poslech	Čtení	Ústní interakce	Samostatný ústní projev	
angličtina	B1	B2	B1	B1	B2

Úrovně: A1/A2: Začátečník - B1/B2: Nezávislý uživatel - C1/C2: Způsobilý uživatel

Organizační/manažerské dovednosti Vedení šachového klubu - Zlínské aplikované sporty z.s. - ŠK

Odborné dovednosti Znalosti programovacích, značkovacích a dotazovacích jazyků: ActionScript, Assembler, C/C++, C#, CSS, HTML5, Java, JavaScript, Python, PHP, SQL, UML, XML

Počítačové dovednosti Velmi dobré dovednosti v uživatelských, vývojových a grafických prostředích:  
Adobe Flash CS3, Codelite, Eclipse, GIMP, Inkscape, Microsoft Office, Microsoft Visual Studio, Wolfram Mathematica

Další dovednosti I. výkonnostní třída v deskové hře Česká dáma, v rámci České republiky

DOPLŇUJÍCÍ  
INFORMACE

1998 – dosud Základní umělecká škola, Zlín (Česká republika) Malba a kresba

Umělecké výstavy 4. – 30.9.2015  
Okamžik; Alternativa - kulturní institut Zlín.  
3. – 30.10.2012  
Tvorba Romana Žáka; Galerie II. patro, radnice, Zlín  
16.11. – 22.12.2007  
Obrázky z vozíčku; Galerie 1499, Olomouc  
30.11. - 23.12.1999  
Šance pro každého; Galerie Masson, Zlín

Zdravotní stav Držitel průkazu ZTP/P

Ing. Roman Žák

## **Řízení systémů pomocí aktivizace mozkových center**

Control Systems by Means of Activation of Brain Centers

Teze disertační práce

Vydala Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,  
nám. T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín.

Náklad: vyšlo elektronicky

Sazba: autor

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Rok vydání 2017

ISBN 978-80-7454-685-3

