



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  

---

**FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ**  
**Katedra informačních a komunikačních technologií v lékařství**

**Přenosné zařízení pro vícekanálový záznam  
EOD u ryb čeledi Mormyridae**

**A portable device for multi-channel EOD  
recording in fishes of the Mormyridae**

Bakalářská práce

Studijní program: Informatika a kybernetika ve zdravotnictví

Autor práce: Kobrin Fedor

Vedoucí práce: Ing. Pavel Smrčka, Ph.D.

---

**Kladno 2023**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kobrin** Jméno: **Fedor** Osobní číslo: **496090**  
Fakulta: **Fakulta biomedicínského inženýrství**  
Garantující katedra: **Katedra informačních a komunikačních technologií v lékařství**  
Studijní program: **Informatika a kybernetika ve zdravotnictví**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Přenosné zařízení pro vícekanálový záznam EOD u ryb čeledi Mormyridae**

Název bakalářské práce anglicky:

**A portable device for multi-channel EOD recording in fishes of the Mormyridae**

Pokyny pro vypracování:

Navrhnete, realizujete a prakticky otestujete zařízení pro dlouhodobé vícekanálové snímání EOD v laboratorních i terénních podmínkách. Zásady pro vypracování: 1) Kompaktní přenosné provedení bez nutnosti připojení externího PC, zapouzdření s krytím minimálně IP63 (lépe IP65) s možností bateriového napájení. Jako vestavěná řídicí jednotka může být použito např. Raspberry Pi 4 s dotykovým displejem, nebo řešení s obdobnými parametry. 2) Měřicí subsystém zařízení umožní připojení nejméně 4 bipolárních EOD kanálů se vstupním rozsahem 10 až 200 mV a vzorkovací frekvencí 40 kHz na kanál. Digitalizace EOD bude realizována pomocí mikrokontroléru ATSAM21, vybaveného příslušným firmware, který bude zajišťovat vzorkování, automatickou detekci EOD s nastavitelnými parametry a přenos signálu do řídicí jednotky. 3) Řídicí jednotka umožní zobrazení EOD včetně výpočtu jeho vybraných parametrů v reálném čase a jejich záznam na vestavěnou SD kartu pro následnou analýzu. 4) Funci zařízení ověřte na zapůjčených exemplářích ryb čeledi Mormyridae. Při dlouhodobých testech se zaměřte na stabilitu a opakovatelnost měření EOD za různých podmínek, sledujte a analyzujte např. vliv cirkadiálních rytmů, změny osvětlení a změny teploty na parametry EOD. Výsledné technické řešení i experimenty podrobně zdokumentujte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Adafruit Industries, Trinket M0 manual, 2019, <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-trinket-m0-circuitpython-arduino.pdf>
- [2] Analog Devices, AD620 datasheet, 2011, <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD620.pdf>
- [3] Mucha et al., A Spark in the Dark: Uncovering Natural Activity Patterns of Mormyrid Weakly Electric Fish, Front. Ecol. Evol., 15 June 2022, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fevo.2022.870043/full>
- [4] Migliaro et al., Daily changes in the electric behavior of weakly electric fish naturally persist in constant darkness and are socially synchronized, Biol Open, 2018 Dec 15, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6310873/>

Jméno a příjmení vedoucí(ho) bakalářské práce:

**doc. Ing. Pavel Smrčka, Ph.D.**

Jméno a příjmení konzultanta(ky) bakalářské práce:

**RNDr. Miroslav Pavelka**

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2024**

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem práci s názvem „Přenosné zařízení pro vícekanálový záznam EOD u ryb čeledi Mormyridae“ vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k práci.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Kladně 17.05.2023

.....

Kobrin Fedor

## **PODĚKOVÁNÍ**

Velice rád bych poděkoval vedoucímu této práce Ing. Pavlu Smrčkovi, Ph.D. za vedení projektu během několika semestrů, za jeho čas a cenné rady při konzultacích.

## **ABSTRAKT**

### **Přenosné zařízení pro vícekanálový záznam EOD u ryb čeledi Mormyridae**

Hlavním cílem této práce je navrhnout, realizovat a prakticky otestovat přenosné a autonomní zařízení pro dlouhodobé vícekanálové snímání EOD (electric organ discharge) ryb čeledi Mormyridae v laboratorních i terénních podmínkách. Za tímto účelem bylo vyrobeno měřicí zařízení schopné detekovat průběhy EOD, dále byl navržen a zprovozněn systém pod Raspberry Pi 3 včetně přijímacího softwaru umožňujícího zobrazení průběhů EOD v reálném čase a jejich záznam na vestavěnou SD kartu pro následnou analýzu. Výsledné zařízení má přenosné provedení bez nutnosti připojení externího počítače, zapouzdření s krytím IP67 s možností bateriového napájení a připojení do 4 bipolárních EOD kanálů. Funkčnost zařízení je ověřena na zapůjčených exemplářích ryb prostřednictvím experimentů zaměřených na stabilitu měření EOD za různých podmínek.

### **Klíčová slova**

Mormyridae, EOD, snímací elektrody, Raspberry Pi, přístrojový zesilovač

## **ABSTRACT**

### **A portable device for multi-channel EOD recording in fishes of the Mormyridae**

The main goal of this work is to design, implement and practically test a portable and autonomous device for long-term multi-channel sensing of EOD (electric organ discharge) of Mormyridae fish in laboratory and field conditions. For this purpose a measuring device capable of detecting EOD waveforms was produced, and a system under Raspberry Pi 3 was designed and put into operation, including receiving software allowing real-time display of EOD waveforms and recording them on an embedded SD card for subsequent analysis. The resulting device has a portable design with no external computer connection required, IP67 encapsulation with battery power and connectivity up to 4 bipolar EOD channels. The functionality of the device is verified on borrowed specimens of fish through experiments focused on the stability of EOD measurements under different conditions.

### **Keywords**

Mormyridae, EOD, sensing electrode, Raspberry Pi, instrumentation amplifier

# Obsah

<b>Seznam obrázků a zkratk</b> .....	<b>8</b>
<b>1 Úvod</b> .....	<b>10</b>
<b>2 Přehled současného stavu</b> .....	<b>11</b>
2.1 O elektrických rybách, čeledi Mormyridae a EOD .....	11
2.2 HackEEG Arduino shield .....	14
<b>3 Metody</b> .....	<b>17</b>
3.1 Metody detekce .....	17
3.1.1 Prahování amplitudy.....	17
3.1.2 Metoda založená na první derivaci.....	18
3.1.3 Zjednodušená metoda založená na první derivaci.....	18
3.2 Metody snímání EOD.....	19
3.3 Návrh EOD měřicího zařízení .....	20
3.4 Návrh celého systému .....	22
<b>4 Realizace</b> .....	<b>23</b>
4.1 Software .....	23
4.1.1 Firmware pro jednokanálové EOD měřicí zařízení.....	23
4.1.2 Přijímací software.....	25
4.1.3 Správce oken FVWM .....	27
4.2 Hardware .....	28
4.2.1 Snímací elektrody .....	28
4.2.2 Měřicí EOD subsystém.....	30
4.2.3 Celý systém .....	33
<b>5 Experimenty</b> .....	<b>35</b>
<b>6 Diskuze</b> .....	<b>42</b>
<b>7 Závěr</b> .....	<b>43</b>
<b>Seznam použité literatury</b> .....	<b>44</b>

# Seznam obrázků a zkratk

## Seznam obrázků

Číslo	Popis
Obr. 2.1	Umístění elektrického orgánu u ryb čeledi Mormyridae, CNS je znázorněn žlutě a elektroreceptory šedě
Obr. 2.2	Mormyridae vytvářejí druhově specifické EOD
Obr. 2.3	Příklady nomenklatury EOD
Obr. 2.4	Souhrn vzorků SPI produkovaných jednotlivými rybami, včetně kontextu, ve kterém jsou produkovány
Obr. 2.5	HackEEG s konektory pro elektrody
Obr. 3.1	Grafické vysvětlení zpracování původně měřeného signálu pro detekci metodou založenou na první derivaci
Obr. 3.2	Grafické vysvětlení zpracování původně měřeného signálu pro detekci zjednodušenou metodou založenou na první derivaci
Obr. 3.3	Návrh akvarijní trubice se snímacími elektrodami
Obr. 3.4	Blokové schéma měřicího zařízení EOD
Obr. 3.5	Schéma zapojení celého systému
Obr. 4.1	Diagram aktivit firmwaru pro jednokanálové EOD měřicí zařízení
Obr. 4.2	Diagram aktivit přijímacího softwaru
Obr. 4.3	Příklad záznamu
Obr. 4.4	Screenshot spuštěných přijímacích programů za využitím FVWM
Obr. 4.5	Schéma konstrukce snímacích elektrod v akvarijní trubici
Obr. 4.6	Trubka s nainstalovanými elektrodami, referenční elektroda a konektor Jack pro jejich připojení
Obr. 4.7	Schéma vnitřní struktury součástí měřicího EOD zařízení a jejich propojení
Obr. 4.8	Schéma propojení součástí měřicího EOD zařízení
Obr. 4.9	Realizované jednokanálové měřicí EOD zařízení
Obr. 4.10	Realizované zařízení pro vícekanálový záznam EOD u ryb čeledi Mormyridae (nezapouzdřené)
Obr. 4.11	Realizované přenosné zařízení pro vícekanálový záznam EOD u ryb čeledi Mormyridae
Obr. 5.1	Porovnání EOD signálů mezi dnem a nocí
Obr. 5.2	Grafy EOD a SPI při schovávání ryby
Obr. 5.3	Graf elektrické aktivity ryby během 24 hodin
Obr. 5.4	Graf elektrické aktivity ryby během snižování teploty vody v akváriu
Obr. 5.5	Porovnání průběhů EOD dvou druhů ryb čeledi Mormyridae: <i>Petrocephalus simus</i> a <i>Brienomyrus brachyistius</i>
Obr. 5.6	Průběh trénování neuroní sítě a výsledky testování



## Seznam zkratek

Zkratka	Význam
EOD	Electric organ discharge, výboj elektrického orgánu
SPI	Sekvence pulzních intervalů
EEG	Elektroencefalografie
EMG	Elektromyografie
EKG	Elektrokardiografie
AD	Analogově digitální převodník
API	Application Programming Interface, aplikační programové rozhraní
SPI	Serial Peripheral Interface, sériové periferní rozhraní
DMA	Direct Memory Access, přímý přístup do paměti
JSON	JavaScript Object Notation, JavaScriptový objektový zápis
KIT	Katedra informačních a komunikačních technologií v lékařství
FBMI	Fakulta biomedicínského inženýrství
FVWM	F Virtual Window Manager
IDE	Integrated Development Environment, integrované vývojové prostředí
CSV	Comma-separated values, hodnoty oddělené čárkami
TWM	Tab Window Manager
PVC	Polyvinylchlorid
CMOS	Complementary Meta-Oxide-Semiconductor
RTC	Real time clock, hodiny reálného času
TC	Time clock, časovač

# 1 Úvod

Mohlo by se zdát, že v dnešním světě lidé vědí o své planetě a jejich obyvatelích úplně vše a lidstvu už zbývá usilovat jen o vesmír, ale není to tak. Na Zemi je stále mnoho záhad čekajících na své objevení, a člověk díky své zvědavosti stále je hledá a zkoumá. To platí i pro studium elektrických ryb, jako například čeled' Mormyridae, která má unikátní schopnost vyrábět elektrické impulzy používané pro elektrolokaci a elektrokomunikaci. Samozřejmě k jejich studiu jsou potřeba vhodné nástroje, realizací jednoho z nich se bude zabývat tato práce.

Cílem této práce je navrhnout, realizovat a prakticky otestovat zařízení pro dlouhodobé vícekanálové snímání EOD (electric organ discharge) ryb čeledi Mormyridae v laboratorních i terénních podmínkách. Musí mít kompaktní přenosné provedení bez nutnosti připojení externího počítače, zapouzdření s krytím minimálně IP63 s možností bateriového napájení. Dále musí umožňovat připojení nejméně 4 bipolárních EOD kanálů a zobrazení průběhů EOD v reálném čase a jejich záznam na vestavěnou SD kartu pro následnou analýzu. Funkčnost zařízení bude ověřena na zapůjčených exemplářích ryb prostřednictvím experimentů zaměřených na stabilitu měření EOD za různých podmínek.

První část této bakalářské práce dává představu o čeledi ryb Mormyridae a jejich schopnosti vyrábět elektrické impulzy a také se věnuje popisu alternativní metody pro vytvoření systému schopného měřit biologické signály ryb. Další část práce se zabývá návrhem celého systému a použitými metodami. Poté se věnuje popisu realizace přenosného zařízení pro vícekanálový záznam EOD. Poslední část popisuje experimenty, které byly provedeny na rybách čeledi Mormyridae, ověřující funkčnost zkonstruovaného zařízení a obsahuje diskusi s konečným zhodnocením celé práce.

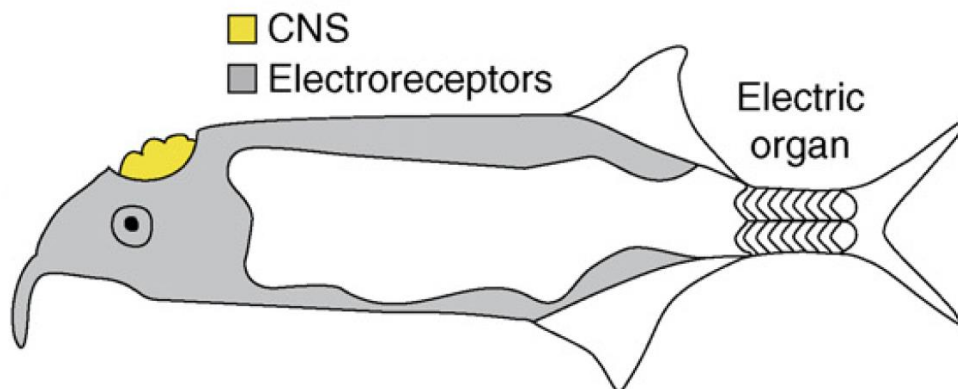
## 2 Přehled současného stavu

Tato úvodní kapitola dává představu o čeledi ryb Mormyridae a jejich schopnosti vyrábět elektrické impulzy. Vysvětluje, jaké parametry tyto impulzy mají a jak se mohou lišit. Následně se kapitola věnuje popisu alternativní metody pro vytvoření systému schopného měřit biologické signály ryb. Tato metoda využívá hotové experimentální zařízení zvané HackEEG, které bylo původně vyvinuto pro snímání elektrické aktivity lidského mozku.

### 2.1 O elektrických rybách, čeledi Mormyridae a EOD

Mnoho mořských a sladkovodních ryb je elektro-receptivní. Většina elektro-receptivních ryb detekuje slabá elektrická pole, která pocházejí z biotického, nebo abiotického prostředí a stimulují jejich elektroreceptory, což je proces zvaný pasivní elektrolokace. [1] Naproti tomu ryby, které používají aktivní elektrolokaci, aktivně vysílají elektrické signály a vnímají je poté, co byly upraveny vnějším prostředím, jako třeba ryby čeledi Mormyridae, u kterých jsou hřbet a břicho pokryté tenkou vrstvou kůže perforovanou malými póry, které vedou k elektroreceptorům.

Elektrické ryby generují a vnímají elektrická pole pro navigaci a komunikaci. Tyto signály mohou být energeticky nákladné vyrábět a přitahovat elektroreceptivní dravce. Aby se minimalizovaly náklady a rizika, některé elektrické ryby, které jsou aktivní v noci, rychle zvyšují sílu svých signálů pouze v době vysoké sociální aktivity, ať už se blíží noc, nebo v reakci na sociální setkání. Ukazuje se, že elektrické ryby gymnotiform *Sternopygus macrurus* rychle zvyšují amplitudu signálu o 40% v noci a během sociální aktivity. *S. macrurus* tak udržuje cirkadiánní rytmus v amplitudě signálu a přizpůsobuje se během několika minut okolním událostem zvýšením amplitudy signálu rychlým transportem iontovými kanály do vzrušivých membrán elektrogenních buněk, což je proces, který přímo modifikuje probíhající chování v reálném čase. [2]

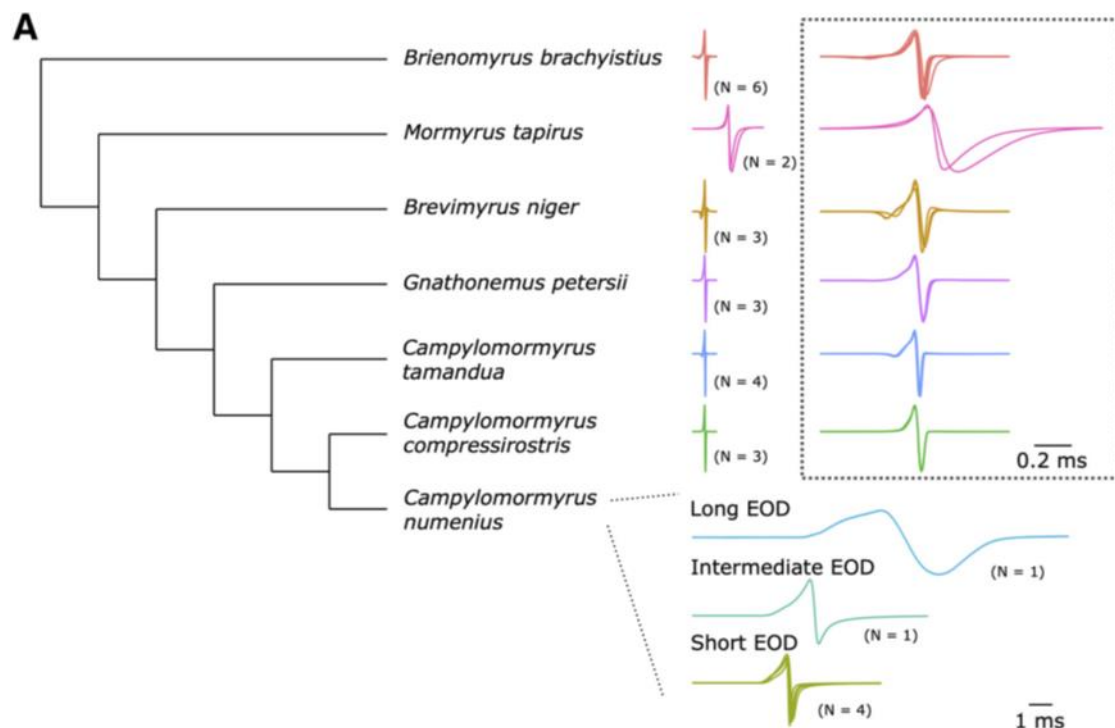


**Obr. 2.1:** Umístění elektrického orgánu u ryb čeledi Mormyridae, CNS je znázorněn žlutě a elektroreceptory šedě. Převzato z [3]

Mormyridae je čeleď ryb, náležící řádu ostnojjazyční. Je rozšířena v tropické Africe a v řece Nil, kde obývají teplé sladké vody. Mormyridae je různorodá rodina, se širokou škálou různých velikostí a tvarů. Maximální délka 1,5 m, obvykle 9-50 cm. Ústa velmi proměnlivého tvaru, často chobotovitá. Mají však řadu jedinečných společných rysů (vyznačují se velkým mozečkem a využíváním elektřiny). [4]

Mormyridae mají elektrické orgány, jsou známí pro jejich schopnost generovat slabé elektrické pole, které jim umožní vnímat své prostředí (aktivní elektrolokace) a komunikovat s dalšími rybami (elektrokomunikace). Elektrický výboj se vyrábí v elektrickém orgánu (EOD – electric organ discharge), který se vyvinul ze svalů a nachází se v ocasu. Během dne se ryby schovávají ve vegetaci nebo v dutinách na břehu řek. V noci se stávají aktivními, opouštějí své úkryty a v nepřítomnosti světla je elektrolokace hlavním smyslem, který používají pro detekci kořisti. Většina jsou dravci a larvy hmyzu tvoří vysoké procento jejich stravy.

Diverzifikace komunikačních signálů je hnací silou ve vývoji senzorických a motorických systémů. Ryby čeledi Mormyridae vytvářejí stereotypní elektrické impulsy. EOD se značně diverzifikoval, zejména v délce trvání, která se u jednotlivých druhů liší od 0,1 do 10 ms (např. 0,17 ms u *Campylomormyrus compressirostris* a 8,59 ms u *Campylomormyrus numenius*). [5]



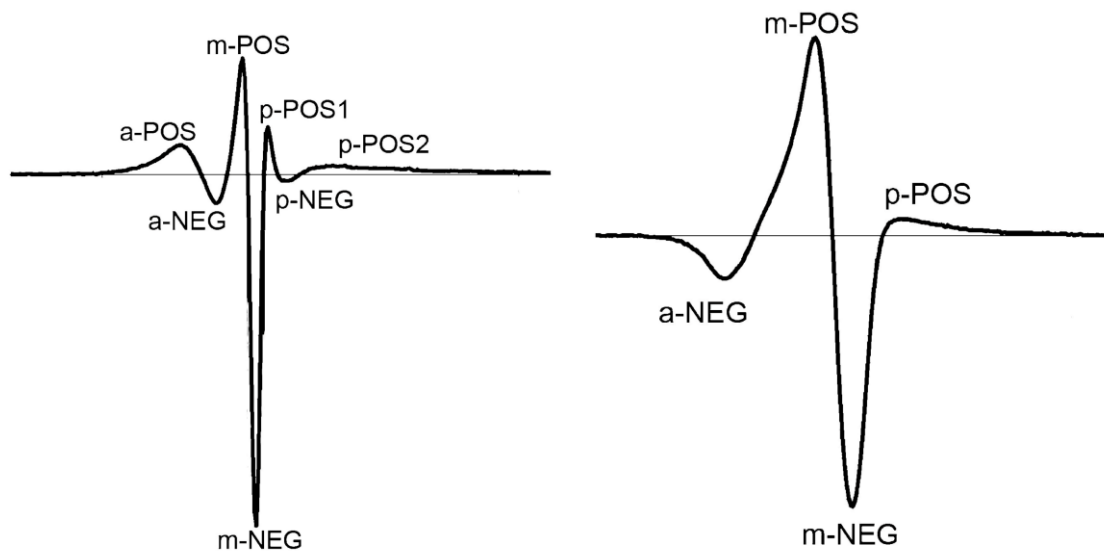
**Obr. 2.2:** Mormyridae vytvářejí druhově specifické EOD. Převzato z [5]

EOD hrají hlavní roli v územních interakcích. Průběh EOD se v krátkých časových obdobích výrazně nemění, a tak vypovídá o identitě jednotlivce, jako je pohlaví, druhu a vývojovém stavu. Několik druhů vytváří sexuálně dimorfní EOD, samci obvykle emitují

delší EOD než samice [6]. Sexuálně nezralí samci mají krátké, samičí EOD. Existuje však řada faktorů, které mohou ovlivnit EOD v krátkodobém horizontu, včetně podmínek prostředí jako je teplota vody, také i biologické faktory, jako je postavení samce v hierarchii dominance.

Změny průběhů EOD mohou nastat u různých druhů během vývoje, protože larvy některých druhů mají samostatný larvální elektrický orgán produkující zcela odlišné výbojové průběhy. EOD průběh je také ovlivněn hormonálním stavem jedince. Během období tření se EOD zralých samců často liší od samic nebo nezralých samců v několika charakteristikách výboje. Nicméně, EOD jsou považovány za druhově specifické, a trvání, počet a polarita fází výboje jsou určeny geneticky a morfologickou strukturou elektrického orgánu [7]. U všech dosud studovaných druhů Mormyridae, vizuální narážky pravděpodobně nehrají žádnou roli během námluvy, protože reprodukce probíhá v noci. Bylo navrženo, že průběh EOD představuje za těchto podmínek důležitý podnět pro rozpoznávání partnera, a že by v některých případech mohl sloužit jako reprodukční bariéra.

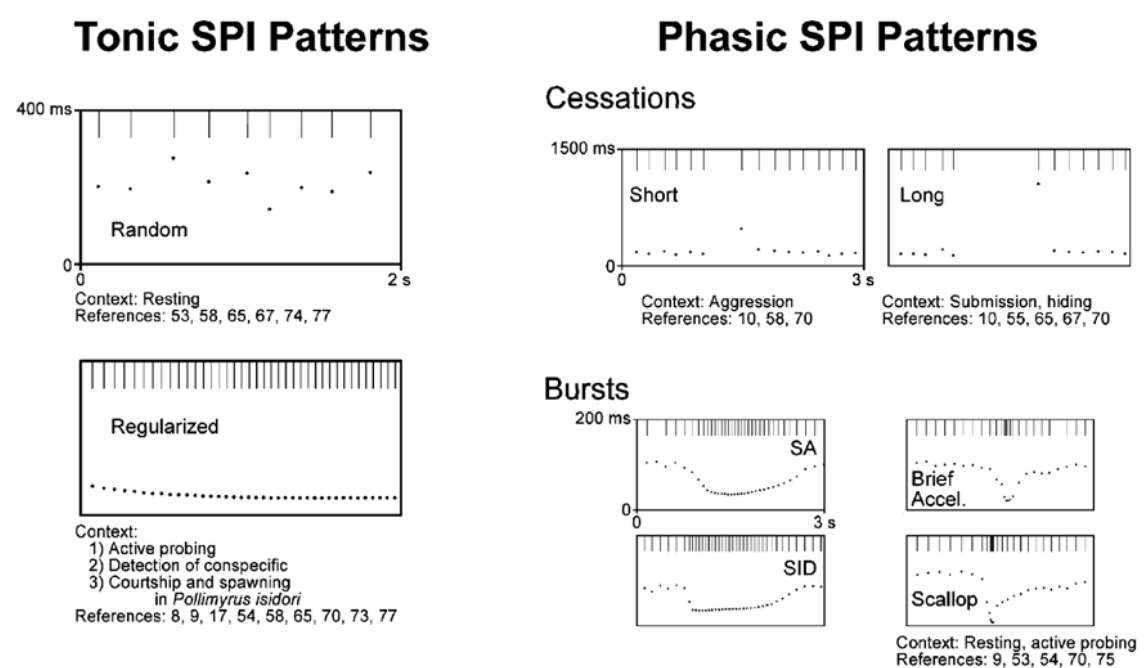
Zavádí se i nomenklatura charakteristik EOD, která může být aplikována na různé průběhy EOD a umožňuje tak mezidruhové srovnání. Hlavní pozitivní fáze a negativní fáze označují se v některých studiích jako (m-POS, m-NEG). Toto jsou obvykle fáze s největší amplitudou. Fáze před těmito hlavními fázemi bývá indexována jako přední/anterior (např. a-POS, a-NEG), fáze po hlavní negativní fázi jsou nazývány zadní/posterior fáze (např. p-POS). [8]



**Obr. 2.3:** Příklady nomenklatury EOD. Převzato z [8]

Jako další parametr se uvádí sekvence pulzních intervalů (SPI), která je variabilní a hraje roli v signalizaci stavů ryby. Mohou být vytvořeny různé typy SPI, včetně tonických vzorů, jako jsou "random" (náhodné) a "regularized" (regularizované), a fázové vzory,

jako jsou "bursts" (výbuchy) a "cessations" (zastavení). Na rozdíl od EOD je SPI velmi variabilní od okamžiku k okamžiku, v rozmezí od desítek do několika stovek milisekund. Tato konstantní variace naznačuje, že SPI je méně důležitá pro rozpoznávání odesílatele a hraje větší roli při signalizaci stavu odesílatele. Různé vzorce SPI byly spojeny s agresivním chováním, signalizací hrozby, submisivním chováním, detekcí jiné ryby, a námluvami. Navzdory variabilitě SPI, existují druhové, pohlavní a individuální rozdíly v celkové distribuci intervalů EOD a existují důkazy, že tyto rozdíly hrají roli v rozpoznávání ryb a pohlaví u některých druhů. Nicméně, existují druhy, u kterých SPI hraje malou či žádnou roli v rozpoznávání odesílatele. [9]



**Obr. 2.4:** Souhrn vzorků SPI produkovaných jednotlivými rybami, včetně kontextu, ve kterém jsou produkovány. Převzato z [9]

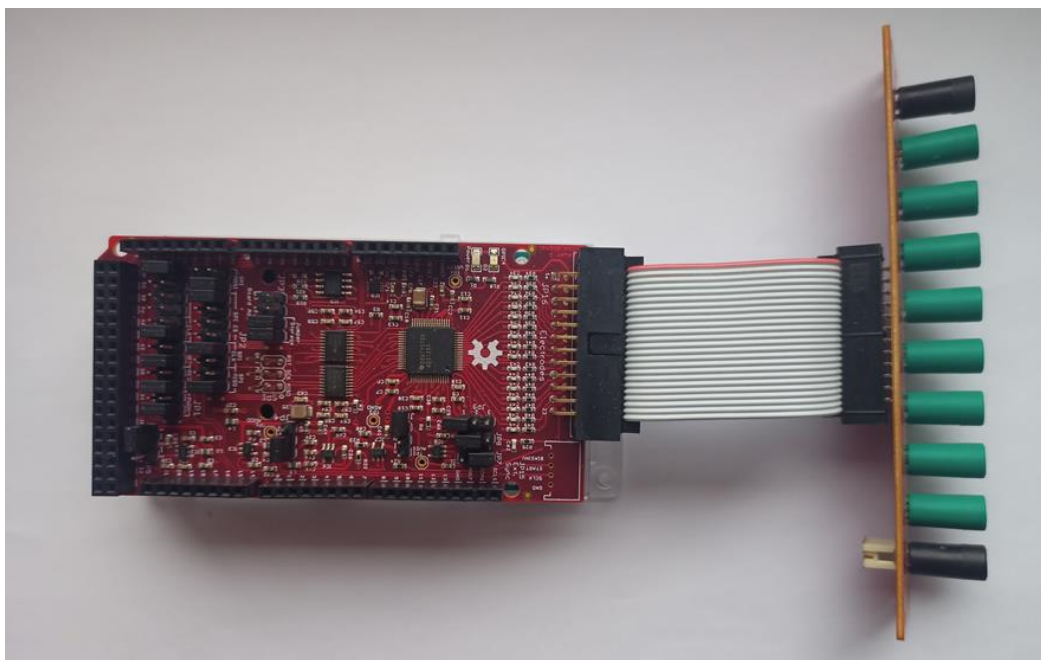
## 2.2 HackEEG Arduino shield

Před tím, než jsem začal pracovat na této práci, jsem zkoušel rozběhnout podobný systém pro snímání a vizualizaci EOD signálů ryb čeledi Mormyridae na základě zařízení HackEEG.

HackEEG je vysoce výkonný, plně open source TI ADS1299 Arduino shield, který se hodí pro digitalizaci biologických signálů, jako je EEG, EMG a EKG. To je laboratorní přístroj s otevřeným zdrojovým kódem. Veškerý hardware, ovladače a Python klientský software jsou zcela open source a snadno modifikovatelné. HackEEG umožňuje využívat celou škálu funkcí a výkonu systému na čipu TI ADS1299. Ovladače Arduino a klientský software v jazyce Python umožňují kompletní přístup k registrům ADS1299 a mohou číst 8 kanálů dat z 24bitového AD při maximální rychlosti 16 000 vzorků za sekundu. [10]

System HackEEG se skládá z HackEEG připojeného k Arduino Due, ovladače pro HackEEG spuštěného na Arduino, klientského programu pro čtení dat z HackEEG/Arduina a grafického rozhraní OpenBCI, které je upraveno tak, aby přijímalo vstupy z vrstvy Lab Streaming Layer. [11]

Při přípravných experimentech jsem nepracoval s OpenBCI, protože za úkol jsem měl rozběhnout systém HackEEG a detekovat EOD signály v reálném čase.



**Obr. 2.5:** HackEEG s konektory pro elektrody

Ovladač pro HackEEG běžící na Arduino komunikuje s čipem ADS1299 prostřednictvím rozhraní SPI (Serial Peripheral Interface). Pro rychlost přenosu dat od 250 do 8000 vzorků za sekundu ovladač defaultně používá vestavěný software SPI Arduino API. Ale pro vzorkování blízké k 16000 vzorkům za sekundu je nutno použít vestavěný do Arduino Due Atmel SAM3X8E CPU, který má SPI DMA (Direct Memory Access) rozhraní. Použití SPI DMA přenesou veškerou komunikaci SPI do SAM3X8E DMA kontroléru a uvolní CPU pro další úkoly, jako je sériová komunikace. Aby šlo povolit použití SPI DMA, je třeba změnit několik konstant ve zdrojovém kódu ovladače.

Další část je klientský software v jazyce Python pro HackEEG. Data lze snímat pomocí programu `hackeeg_stream.py`, který je součástí toho softwaru. Program může získat několik hodnot na vstup, například:

```
hackeeg_stream --continuous --sps 16000 --messagepack
```

Continuous znamená, že program bude snímat data, dokud nebude stisknuta klávesa Enter. Sps je vzorkovací frekvence (samples per second), parametr `messagepack` použije místo JSON datový formát MessagePack, který bude vždy nutný, protože právě s ním lze dosáhnout potřebných rychlostí vzorkování.

I když nyní lze číst data, stále to není pohodlné a názorné. Při spuštění programu dojde k výpisu všech dat ze všech kanálů přímo do konzole. Navíc jsem potřeboval detekovat EOD signály v reálném čase za chodu programu, proto jsem ho ještě modifikoval. Ve finále program byl schopen provádět detekci EOD, zvukově ji signalizovat a ukládat všechna data do externího souboru.

Ve výsledku to bylo úspěšné ověření možnosti vytvoření systému pro měření a záznam EOD. Pak jsem se ale vydal trochu jinou cestou, nezávislou na hotovém předpřipraveném experimentálním řešení měřicího zařízení. Místo toho bude vyrobeno vlastní včetně firmwaru a klientského softwaru. Hlavním důvodem je skutečnost, že HackEEG sice umožnilo prvotní náhled na EOD a seznámení s problematikou, ale je zde limit maximální vzorkovací frekvence 16 000 Hz, což je pro precizní snímání EOD mezní a spíše nedostačující hodnota – ukazuje se, že potřebná vzorkovací frekvence je vyšší, 30–40 kHz.



## 3 Metody

V této kapitole se budu věnovat popisu metod, které jsem použil v rámci této práce. Nejprve se zaměřím na otestované metody detekce EOD signálů u ryb čeledi Mormyridae včetně jejich výhod a nevýhod. Dále popíši metody snímání signálů, kde se zaměřím na elektrody používané pro snímání EOD signálů a jejich rozmístění. V poslední části kapitoly se budu věnovat návrhu měřicího zařízení a celého systému, který bude používán pro měření, vizualizaci a záznam signálů ryb.

### 3.1 Metody detekce

Výboje elektrického organu u ryb čeledi Mormyridae (EOD) jsou elektrické signály, které jim umožňují vnímat okolní prostředí a komunikovat s dalšími rybami. Tyto signály mají charakteristické vlastnosti, které jsou odlišné od jiných biologických signálů, a navíc se také liší mezi jednotlivými rybami čeledi Mormyridae v závislosti na jejich druhu, pohlaví, ročním období a věku. Elektrické vlastnosti signálu, jako například amplituda a frekvence, jsou důležité pro správnou identifikaci EOD a rozlišení od šumu.

Pro zaznamenání a analýzu EOD signálů je důležité použít vhodné metody snímání, které umožňují efektivně detekovat tyto signály. V této podkapitole se zaměřím na přehled metod detekce EOD signálů u ryb čeledi Mormyridae, které jsem v průběhu vývoje zařízení vyzkoušel. Každá z těchto metod má své výhody a nevýhody a je důležité vybrat správnou metodu pro konkrétní aplikaci.

#### 3.1.1 Prahování amplitudy

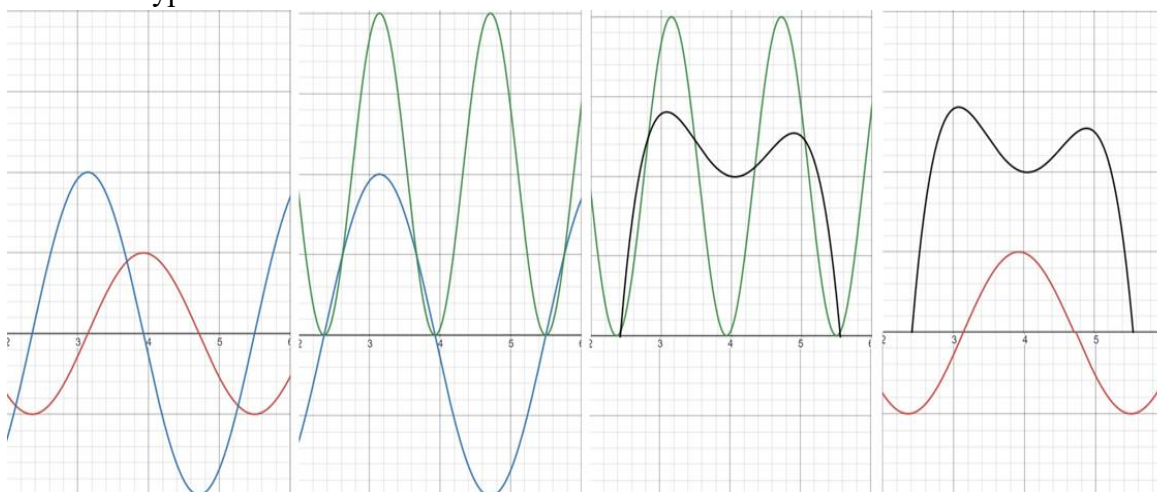
Prahování (thresholding) je jednou z nejjednodušších a nejčastěji používaných metod detekce signálu. Tato metoda spočívá v aplikaci prahu na vzorek signálu. Pro použití prahování je třeba nejprve určit vhodnou úroveň prahu, kterou lze stanovit různými způsoby, jako například pomocí statistických metod nebo ručním nastavením. Poté se hodnoty vzorků porovnávají s touto úrovní prahu a pokud hodnota překročí práh, signál je detekován.

Výhodou prahování je jeho jednoduchost a rychlost implementace. Navíc, prahování lze použít v kombinaci s dalšími metodami detekce signálu. Nicméně, tato metoda má také své nevýhody. S čím jsem se setkal osobně tak kolísání nulové izolinie, neboť ofsetové složky (plavání signálu), které jsou značné. Kvůli tomu není prahování dost stabilní a detekce, která dnes funguje bez problémů, za pár dní nefunguje vůbec. Metoda je taky citlivá i na změny úrovně přítomného šumu, což následně také vede k chybné detekci.

### 3.1.2 Metoda založená na první derivaci

Tato metoda pro detekci je založená na první derivaci a nezávisí na kolísání nulové izoliny jako prahování. Je používána pro detekci malých signálů s rychlými změnami v čase. Funguje tak, že původní signál je derivován metodou konečných diferencí a tím se získá odhad první derivace signálu, která odpovídá rychlosti jeho změn v čase. Metodu lze s výhodou zkombinovat s následným výpočtem druhé mocniny derivace, což zvýrazní prudké změny signálu a obrátí záporné hodnoty. Posledním typickým krokem je průměrování klouzavým součtem, které signál vyhladí a sloučí jeho špičky. Výsledný upravený signál je kladný a několikanásobně zesílený v porovnání s původním, jsou lépe zvýrazněny změny signálu v čase, což usnadňuje následnou detekci. Grafické znázornění metody je na obrázku 3.1.

Při správné realizaci je metoda mnohem přesnější než samostatné prahování, což je hlavní výhodou, proč jsem ji zkoušel. Implementace ale už není tak jednoduchá a je o něco výpočetně náročnější, zejména pokud se jedná o detekci signálu v reálném čase. Implementace této metody vyžaduje poměrně složitý matematický postup, který musí být správně naprogramován a má větší jak časovou, tak i paměťovou náročnost, zejména při realizaci výpočtu v reálném čase.



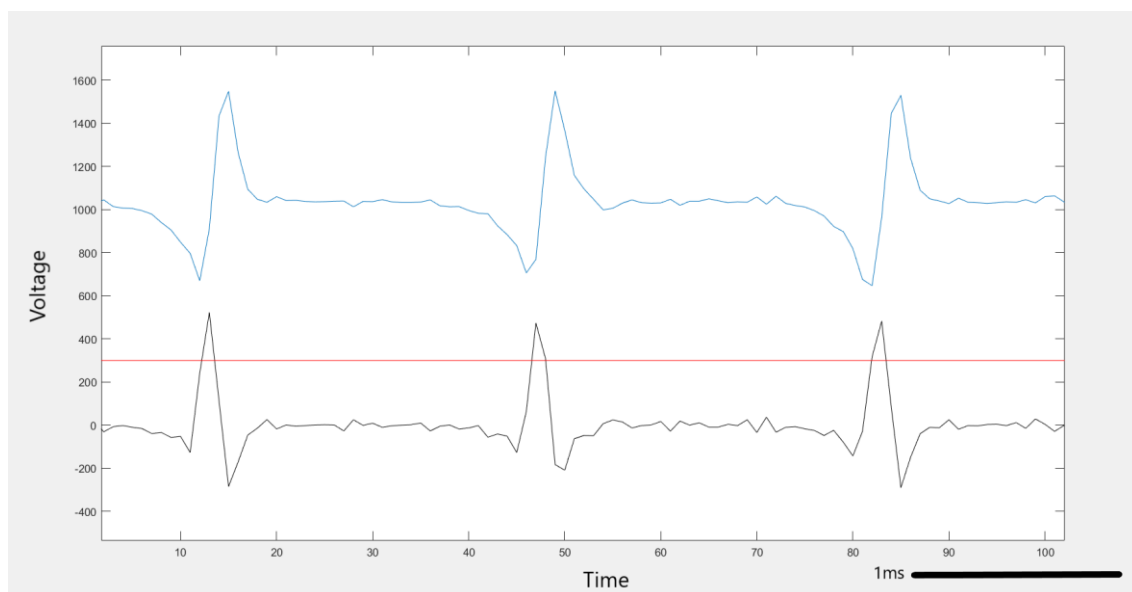
**Obr. 3.1:** Grafické vysvětlení zpracování původně měřeného signálu pro detekci metodou založenou na první derivaci. Oranžová křivka je původní signál, modrá je derivace původního, zelená je druhá mocnina derivace, černá je průměr mocniny.

### 3.1.3 Zjednodušená metoda založená na první derivaci

Hlavním principem této metody je opět využití první derivace vstupního signálu, u které jsou stanoveny prahové hodnoty pro obě polarity (nárůst i pokles amplitudy). Díky použití derivace detekce nezávisí na kolísání nulové izoliny, protože pro detekci hraje roli pouze rychlost změn signálu, a ne jeho okamžitá hodnota. Na obrázku 3.2 je uveden příklad použití metody. Nahoře je původní signál, dole je jeho první derivace. Oranžová přímková je práh stanoveny pro zachycení nárůstu amplitudy.

Výhodou této metody je její jednoduchost na implementaci a výpočetní nenáročnost. Na druhé straně je ale tato metoda citlivá na šum, pokud má podobné charakteristiky jako detekované píky, a vyžaduje pečlivé nastavení prahových hodnot, aby nedocházelo k falešným detekcím a zároveň metoda zůstala dostatečně citlivá.

Pro konečnou verzi zařízení jsem zvolil právě tuto metodu kvůli její nenáročnosti ve srovnání s variantou popsanou v podkapitole 3.1.2, protože potřebuji detekovat signály v reálném čase v zařízení s omezenými výpočetními zdroji. Dále není ovlivněna kolísáním nulové izoliny jako obvyčejné prahování, což je nejčastější slabinou vstupních signálů, se kterou jsem se potkával.

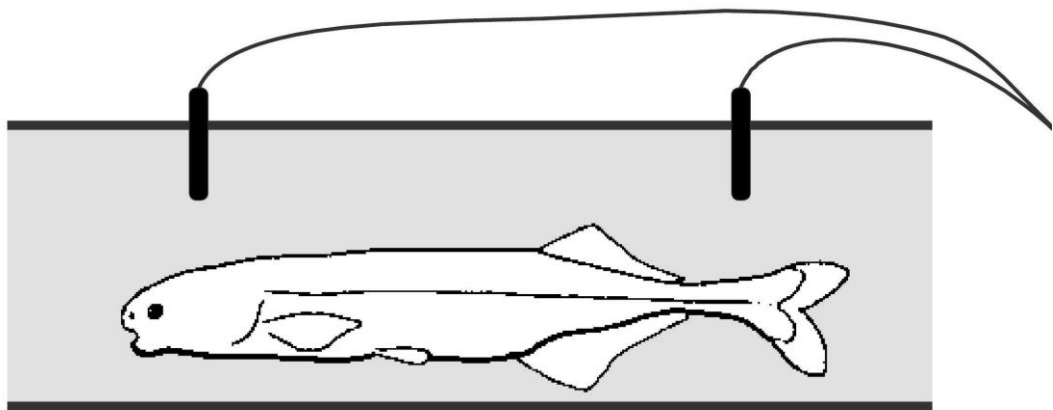


**Obr. 3.2:** Grafické vysvětlení zpracování původně měřeného signálu pro detekci zjednodušenou metodou založenou na první derivaci. Modrá křivka je původní signál, černá je derivace původního, oranžová je práh pro detekci.

## 3.2 Metody snímání EOD

Metody snímání EOD u ryb čeledi Mormyridae lze rozdělit na dvě základní podskupiny: invazivní a neinvazivní. V obou případech se používají elektrody, ale jejich rozmístění a složitost realizace se dramaticky liší. Invazivní metody zahrnují implantace elektrod přímo do těla ryb pomocí chirurgického zákroku. Tento způsob snímání poskytuje mnohem přesnější výsledky měření EOD signálů, protože elektrody jsou umístěny přímo na místě, kde se signály generují. Nicméně, tato metoda je komplikovanější, vyžaduje posouzení humánnosti a může být pro ryby škodlivá. Také omezuje přirozený pohyb ryby a může ovlivnit i její chování. Na druhou stranu neinvazivní metody používají ke snímání EOD elektrody umístěné mimo tělo ryby, což je méně stresující pro ryby a mnohem jednodušší pro implementaci. Nevýhodou ale je to, že tyto metody jsou obecně méně přesné než invazivní, závislé na vzdálenosti a poloze ryby vůči elektrodám a jsou víc ovlivněny vnějšími šumy.

V rámci této práce jsem samozřejmě zvolil neinvazivní metodu pro měření EOD signálů. Snímací elektrody budou rozmístěny v blízkosti těla ryby a budou osazené do úkrytu, kde ryba tráví nejvíc času vzhledem k jejímu nočnímu chování. Díky tomu je zachována integrita okolního prostředí ryby a není vyžadován přímý kontakt s rybou, což minimalizuje možnost způsobení stresu nebo poškození ryby. Úkryt bude tvořit keramická nebo plastová trubice, ve které se ryba bude schovávat, s dvěma otvory na opačných koncích. Snímací elektrody se budou nacházet ve vzdálenosti 6 cm od sebe a tím je zajištěno, že v jakékoliv poloze nebo otočení ryby v trubici je vždycky jedna elektroda blíž k hlavě ryby a druhá k ocasu. Zachycení vnějšího rušení pak může být minimalizováno vhodnou izolací elektrod na vnější straně úkrytu. Tím pádem budou zmírněny hlavní nevýhody neinvazivní metody snímání EOD. Závislost na vzdálenosti ryby od elektrod je minimalizována jejich rozmístěním přímo v úkrytu, závislost na poloze ryby vůči elektrodám je snížena válcovitým tvarem úkrytu a ovlivnění vnějšími šumy je redukováno izolací elektrod od vnějšího prostředí. Schéma navržené trubice je na obrázku 3.3.



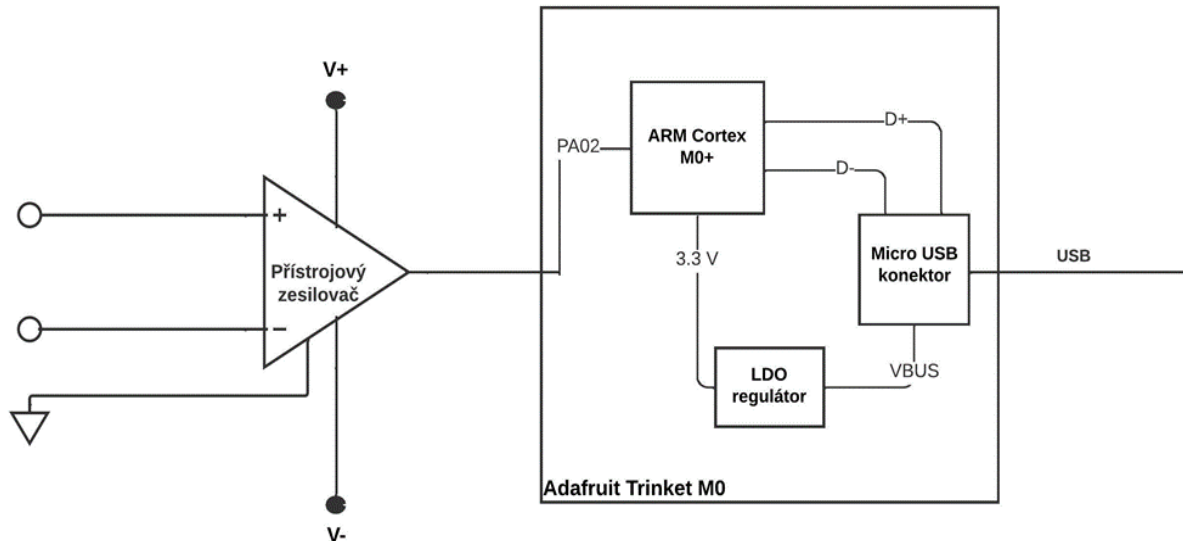
**Obr. 3.3:** Návrh akvarijské trubice se snímacími elektrodami

### 3.3 Návrh EOD měřicího zařízení

Měřicí podjednotka je klíčovou součástí při snímání EOD signálů u ryb čeledi Mormyridae. Toto zařízení slouží k digitalizaci a detekci EOD, které jsou následně přenesené do počítače pro zpracovávání, zobrazení a uložení pomocí specializovaného softwaru. Vzhledem k rychlosti průběhu EOD je pro měření těchto signálů důležité, aby zařízení mělo vysokou vzorkovací frekvenci. Je nutná pro zachycení rychlých změn v EOD a přesné vzorkování signálů. Jednotlivé studie používají různé vzorkovací frekvence, většinou je to desítky kHz, ale některá se vystačí i s 10 kHz [12] a naopak jiná mohou použít až 1 MHz [13]. Měřicí zařízení musí být také vybaveno vhodným přístrojovým zesilovačem, umožňujícím zesílení slabého EOD signálu, který vysílají ryby, na úroveň, která je dostatečně velká pro digitalizaci. Tento zesilovač musí mít takové parametry, aby nedocházelo k deformaci/zkreslení signálu nebo mít možnost je

měnit a nastavovat. Pro účely této práce by stačilo stonásobné zesílení, frekvenční pásmo do 80 kHz a vzorkovací frekvenci 40 kHz. Dále má být zařízení schopné detekovat EOD signály v reálném čase, což je náročný úkol, který vyžaduje zpracování vysokého počtu dat v krátkém časovém intervalu (vzhledem k vysoké frekvenci vzorkování), proto je důležitý výkon použitého mikrokontroléru.

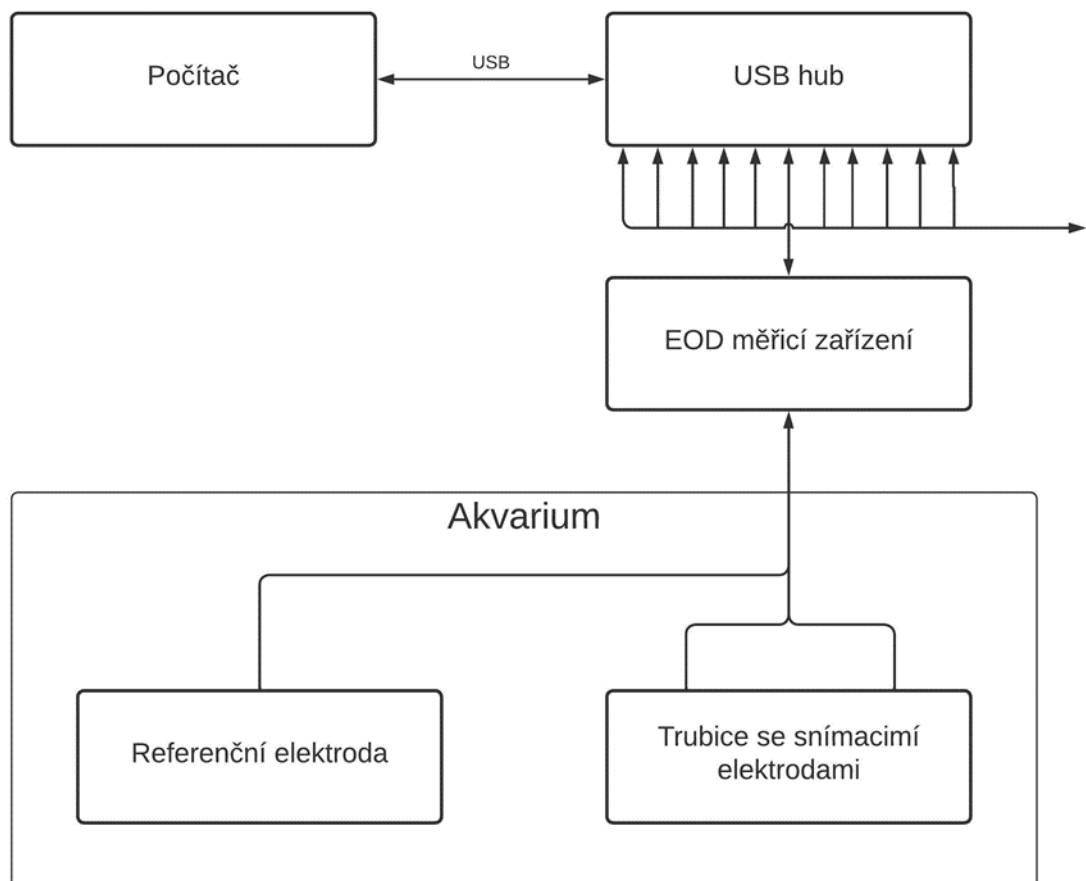
Samotné zařízení se bude skládat ze dvou hlavních částí: modul s přístrojovým zesilovačem a řídicí mikroprocesorová jednotka s mikrokontrolérem. Pro realizaci modulu přístrojového zesilovače byl zvolen obvod AD620, který zajistí zesílení malých střídavých nebo stejnosměrných signálů z analogových snímačů ve vhodném frekvenčním pásmu. Nastavením připojených trimrů lze nastavovat offset a zesílení až na 1000násobek. AD620 je levný, vysoce přesný přístrojový zesilovač, který v základním zapojení vyžaduje pouze jeden externí rezistor pro nastavení zesílení. AD620 je díky své vysoké přesnosti ideální pro použití v přesných systémech sběru dat. Kromě toho je AD620 díky nízkému šumu, nízkému vstupnímu klidovému proudu a nízké spotřebě vhodný pro lékařské aplikace, jako jsou EKG [14]. Navíc je pro tvorbu prototypu na trhu k dispozici řada hotových modulů s AD620 za velmi příznivé ceny. Jako řídicí mikroprocesorová jednotka byl zvolen modul Adafruit Trinket M0, postavený na mikrokontroléru Atmel ATSAMD21 (32bitový procesor Cortex M0+, 48 MHz), malém čipu se spoustou funkcí a velkým výkonem postačujícím pro zpracování dat z elektrod [15]. Blokové schéma navrženého zařízení je představeno na obrázku 3.4.



**Obr. 3.4:** Blokové schéma měřicího zařízení EOD

### 3.4 Návrh celého systému

Vícekanálové měření EOD signálů u ryb čeledi Mormyridae vyžaduje specifický návrh systému, který umožní detekci signálů z více elektrod současně. Ryba se bude nacházet v trubici se snímacími elektrodami, také v akváriu bude referenční elektroda. Všechny tyto elektrody jsou připojeny k jednobančovému zařízení pro měření EOD signálů. Každé zařízení obsahuje obvod pro zesílení a digitalizaci signálů a taky mikrokontrolér pro řízení, zpracování vzorků, detekci EOD a komunikaci s počítačem přes USB rozhraní. USB hub umožňuje připojení více měřicích zařízení k jednomu portu na počítači a tímto dovoluje snímat několik kanálů současně. Každé z těchto jednotlivých zařízení je schopno detekovat EOD signály, a tedy odesílat pouze je, což mnohonásobně zmenšuje datový tok ve srovnání s případem posílání hrubých dat získaných z elektrod do PC (orientační vypočet dává, že při posílání hrubých dat z čtyř kanálů datový tok tvoří 3Mb/s a při posílání pouze EOD signálů je 100Kb/s). Celý systém se ovládá pomocí počítače, který slouží jako centrální řídicí jednotka, která zajišťuje komunikaci s jednotlivými měřicími zařízeními, zpracování naměřených dat, jejich vizualizaci a uložení.



Obr. 3.5: Schéma propojení celého systému

## 4 Realizace

V této kapitole se budu věnovat popisu realizace přenosného zařízení pro vícekanálový záznam EOD u ryb čeledi Mormyridae. Postupuji zde podle návrhu, který jsem představil ve třetí kapitole. Jedná se o systém, který umožňuje získávat signály z více měřících kanálů současně, detekovat je v reálném čase, zobrazovat a ukládat na vestavěnou SD kartu. Rozdělím systém na dvě části a prozkoumám je z hlediska softwaru a hardwaru. V první podkapitole popíši software, který slouží k ovládní a vizualizaci naměřených dat, a firmware pro měřící zařízení, které snímá data z elektrod a detekuje EOD signály. Pak ve druhé podkapitole se zaměřím na konkrétní hardwarové komponenty, včetně měřícího zařízení, snímacích elektrod, jednodeskového počítače Raspberry Pi a další. Cílem této kapitoly je podrobněji popsat všechny součásti systému, jejich funkci a výsledné vlastnosti.

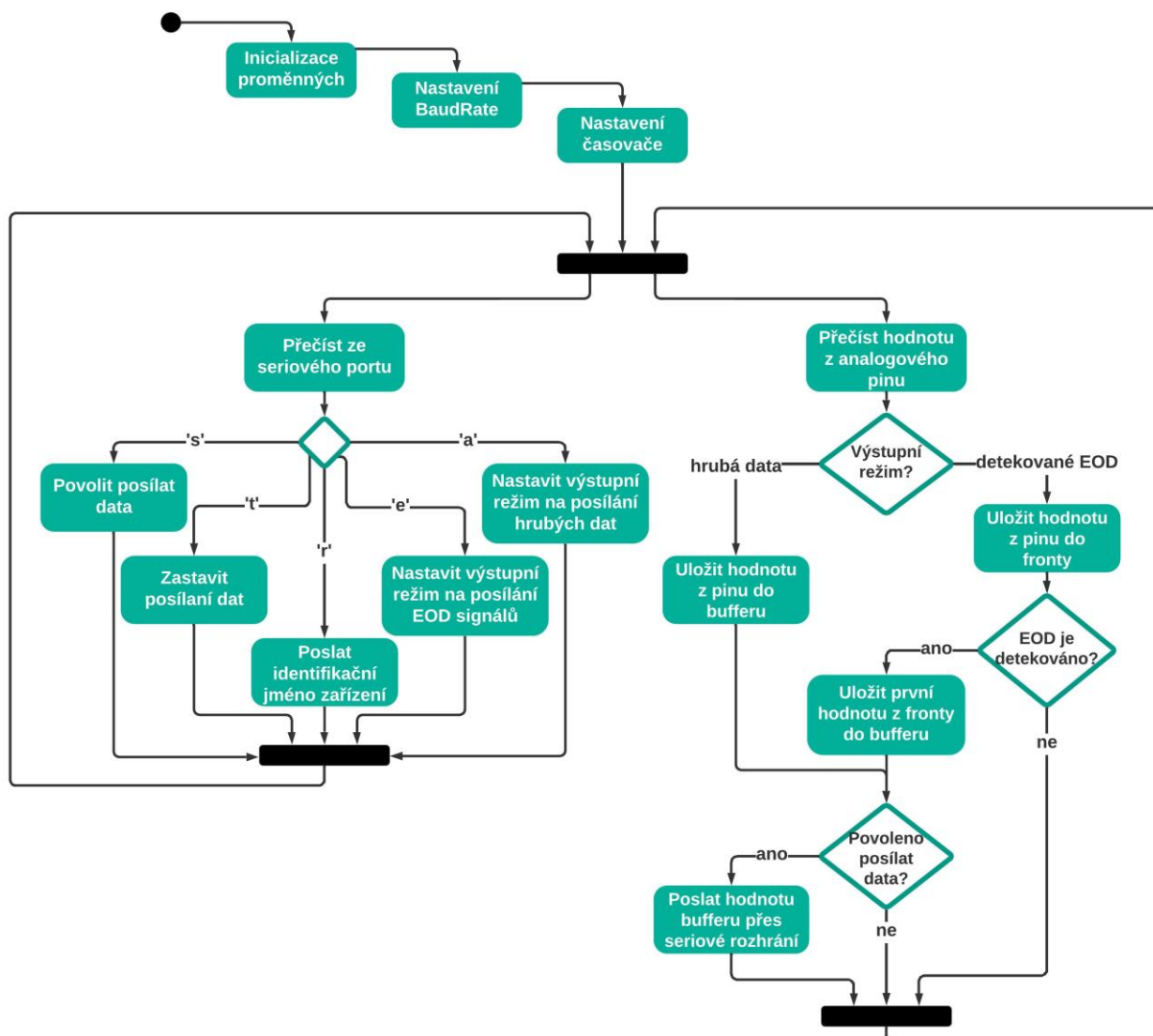
### 4.1 Software

Od začátku jsem měl k dispozici základní firmware a přijímací software, původně vytvořený pro snímání EKG na KIT FBMI. Je to dobrý základ, ale dovoľoval jen zobrazovat hrubá data a samozřejmě potřeboval úpravy pro konkrétní cíle této práce. Tak například přidání konfiguračního souboru pro nastavení parametrů měření, implementace ukládání záznamů, přidání nových příkazů pro ovládní a nastavení měřícího zařízení, implementace nového algoritmu pro detekci EOD v reálném čase, portování programu na Raspberry Pi včetně konfigurace odlehčeného grafického prostředí FVWM. V této podkapitole se zaměřím na výslednou softwarovou složku přenosného zařízení pro vícekanálový záznam EOD.

#### 4.1.1 Firmware pro jednokanálové EOD měřící zařízení

Realizace firmware pro jednokanálové měřící zařízení je jedním z klíčových kroků k vytvoření funkčního zařízení pro vícekanálový záznam EOD, k zajištění správného a spolehlivého fungování celého systému. Firmware je software, který řídí hardware a je uložen přímo ve vestavěném mikrokontroléru. V případě této práce byl firmware vyvíjen s ohledem na specifické požadavky jako vzorkovací frekvence 40 kHz, digitalizace pomocí čipu ATSAM21, automatická detekce EOD v reálném čase. Zvolený mikrokontrolér je schopný splnit tyto požadavky a umožňuje snadnou implementaci firmware díky kompatibilitě s Arduino IDE. Firmware také umožňuje komunikaci s Raspberry Pi přes USB rozhraní a nastavení řady parametrů, jako je například výběr vzorkovací frekvence, nastavení citlivosti detekce, volbu režimu odesílání dat.

Každé zařízení má dva režimy odesílání dat: 1) hrubá data z elektrod, 2) jen detekované EOD signály. Režim je vybírán uživatelem na počítači pomocí přepisu konfiguračního souboru využívaného přijímacím software, který pak přes sériové rozhraní říká zařízení, do jakého režimu se nastavit. V prvním módu se provádí digitalizace EOD a získaná hrubá data se rovnou posílají ve vhodném kódu na sériový port. V druhém módu je už přítomna fronta pro 10 předchozích vzorků, to je nutné pro detekci EOD, která se provádí pomocí metody založené na první derivaci, která je popsána v podkapitole 3.1.3 (jakmile derivace se přesáhne určitého prahu, začne vysílání dat). Kromě samotného signálu se také posílá index aktuálního vzorku, to je pak využíváno při parametrizaci a u výpočtu SPI (sekvence pulzních intervalů). To je v podstatě časový interval mezi EOD. Díky implementované automatické detekci EOD, lze snadno zjistit časový interval mezi nimi. Chod programu je podrobněji znázorněn na obrázku 4.1. Výsledný firmware byl úspěšně otestován na měřicím zařízení, je efektivní a splňuje všechny specifické požadavky.

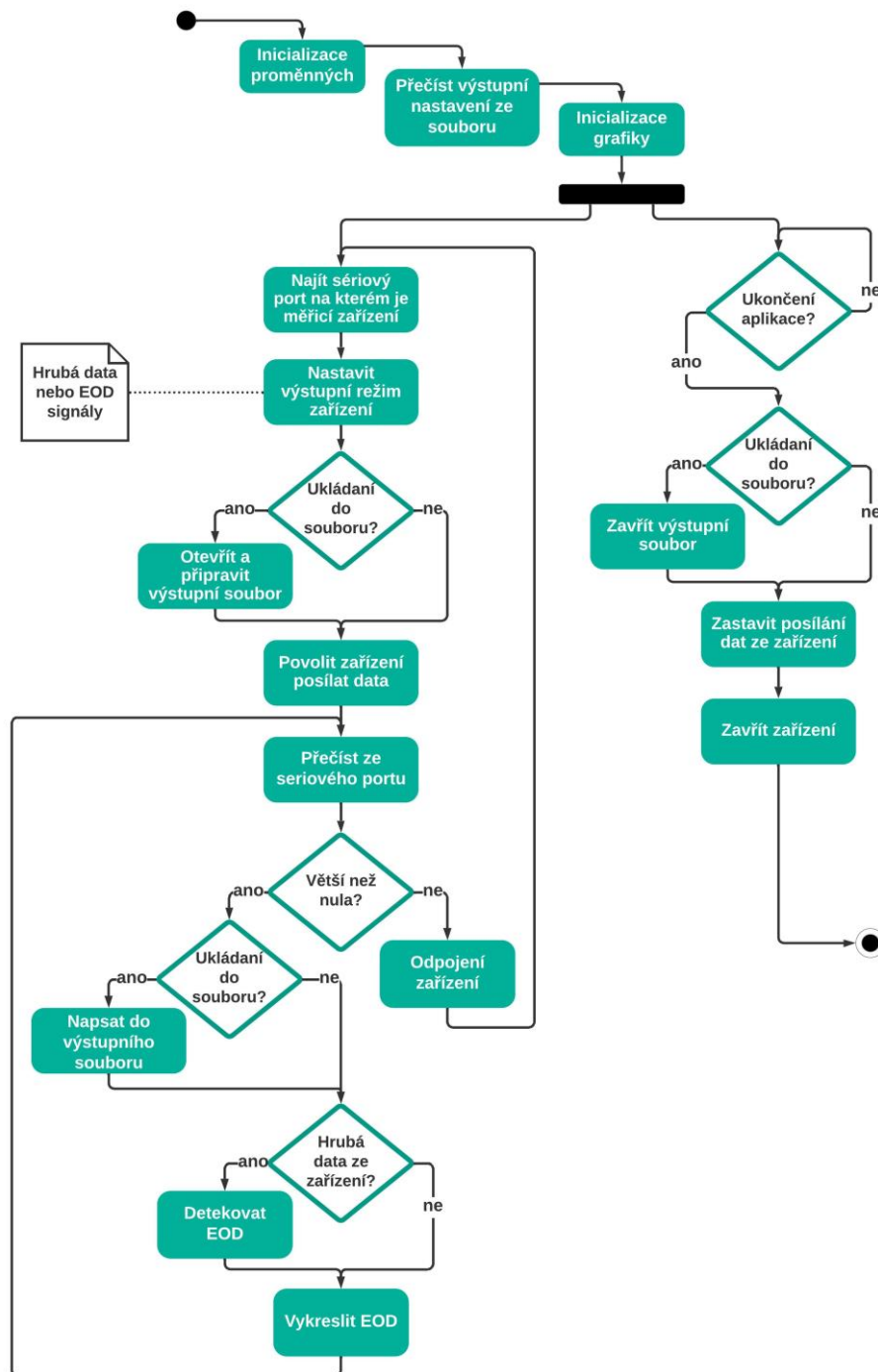


Obr. 4.1: Diagram aktivit firmwaru pro jednokanálové EOD měřicí zařízení



## 4.1.2 Přijímací software

Přijímacího software, který běží na jednodeskovém počítači Raspberry Pi, slouží k ovládní měřicího jednokanálového zařízení, vizualizaci a ukládání naměřených průběhů EOD. Je vytvořen s ohledem na potřeby této práce a umožňuje uživateli sledovat v reálném čase naměřená data, která jsou zobrazována v podobě grafu. Tento software je napsán v programovacím jazyce C s využitím grafické knihovny a knihovny pro sériovou komunikaci. Chod programu je podrobněji znázorněn na obrázku 4.2.



Obr. 4.2: Diagram aktivit přijímacího softwaru

Přijímací software už má víc režimů než firmware: 1) příjem a zobrazení hrubých dat, 2) zobrazení detekovaných EOD, 3) zobrazení detekovaných EOD spolu s jejich parametrizací a uložením do záznamu pro pozdější analýzu. Informaci o tom, do jakého režimu se má software nastavit, získává z konfiguračního souboru, připraveného uživatelem. Tam též bude i jméno souboru, kam ukládat data, pokud bude zvolen odpovídající režim. Po spuštění instance program načte konfiguraci ze souboru, pak začne procházet porty a hledat připojené měřicí zařízení, až bude nalezeno, pošle mu informaci, v jakém režimu musí odesílat data, a pak povel ke startu odesílání. Data se zobrazují pomocí 2D grafické knihovny MGRX [16]. Do okna se vykreslují jednotlivé průběhy EOD a také barevný obdélník označující připojení zařízení (červený – není připojeno, zelený – připojeno). Příjem, zpracování a vykreslení dat závisí na zvoleném režimu. Například když instance dostává hrubá data, pro vykreslení provádí na své straně detekci EOD signálů. Pokud jde o příjem už měřicím zařízením detekovaných EOD signálů, ty se rovnou vykreslují. Třetí režim kromě toho zahrnuje parametrizaci a vytvoření záznamu měření. V tomto případě kromě vykreslení, provádí se vypočet parametrů a následné ukládání dat do souboru ve formátu CSV, který umožňuje snadné načtení do jiného softwaru pro další zpracování dat. V souboru jsou jednotlivé průběhy EOD signálů zaznamenány zvlášť v řádcích, a kromě signálů jsou tam ještě jejich indexy, parametry SPI, datum a čas měření. Na konci záznamu je vypsána spočítaná statistika jako doba měření, frekvence výskytu EOD signálů, maximální, minimální a průměrný časový interval mezi signály (obr. 4.3). Celkově je přijímací software navržen tak, aby umožnil uživateli snadný přehled nad naměřenými průběhy EOD. Díky tomu je možné rychle a efektivně získávat a analyzovat data z EOD signálů.

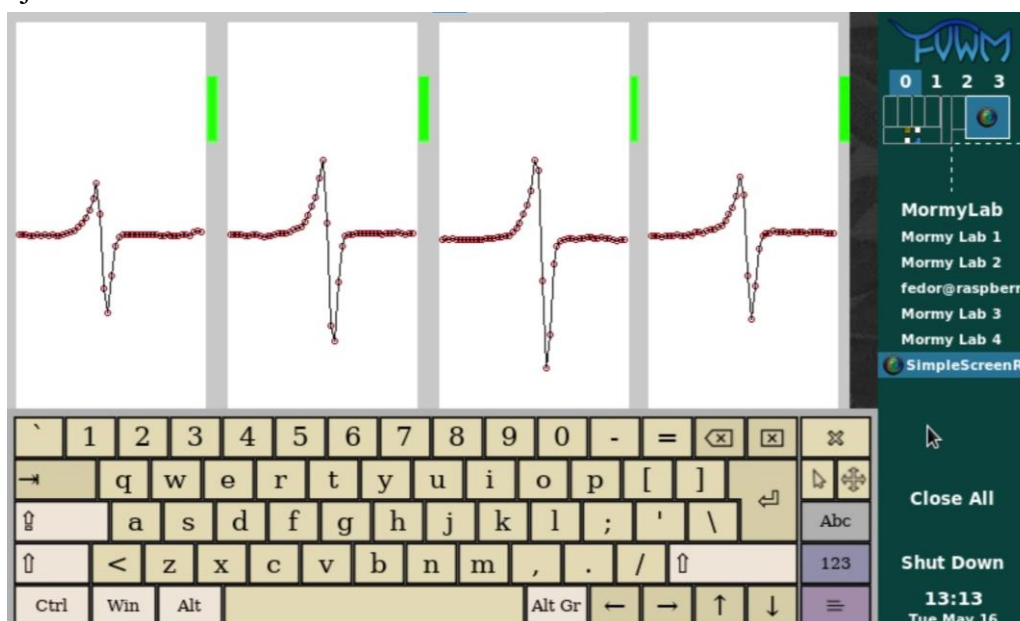
Date Time	SPI in ms	Index High	Index Middle	Index Low	Samples												
16-1-2023 13:44:00		0	0	1677	1888	1876	1910	1896	1895	1922	1939	1952	1983	2031	2		
16-1-2023 13:44:00	565	0	5	3803	1891	1903	1906	1940	1926	1968	1964	1979	2004	2102	2		
16-1-2023 13:44:02	568	0	11	1979	1879	1889	1899	1906	1899	1925	1937	1945	1970	2017	2		
16-1-2023 13:44:02	670	0	18	132	1880	1898	1910	1921	1922	1961	1943	1960	2001	2058	2		
16-1-2023 13:44:02	642	0	24	1238	1873	1888	1916	1919	1941	1935	1952	1972	1976	2042	2		
16-1-2023 13:44:02	320	0	27	1752	1887	1899	1908	1948	1921	1929	1945	1960	1991	2053	2		
16-1-2023 13:44:03	294	0	30	1249	1913	1918	1913	1946	1930	1934	1954	1979	1996	2066	2		
16-1-2023 13:44:03	268	0	32	3786	1892	1892	1901	1899	1917	1934	1958	1936	1966	2021	2		
16-1-2023 13:44:03	497	0	37	3219	1911	1890	1900	1910	1920	1928	1944	1956	1996	2031	2		
Duration in sec	3																
EOD per sec	3																
Average time between EOD in ms	425																
Max SPI interval	670																
Min SPI interval	268																

Obr. 4.3: Příklad záznamu

### 4.1.3 Správce oken FVWM

FVWM (F Virtual Window Manager) je správce oken, který vytvořil Robert Nation jako fork TWM (Tab Window Manager). Jedná se o odlehčený tradiční a velmi flexibilní, rychlý a extrémně konfigurovatelný správce oken, který umožňuje uživatelům přizpůsobit si pracovní prostředí dle svých potřeb a preferencí. Například: vytvářet vlastní klávesové zkratky a kontextová menu, podpora libovolného počtu virtuálních pracovních ploch, z nichž každá může být rozdělena na více stránek, různé vzhledy a vlastnosti oken. Nevýhodou je, že konfigurace FVWM je velmi náročná na znalosti, na oficiální stránce píšou: “Především si uvědomte, že FVWM není procházka růžovým sadem. Často bude z vaší strany zapotřebí hodně práce... Pokud však vytrváte, získáte něco, co bude vyhovovat vašim potřebám” [17].

V FVWM jsem vytvořil prostředí pro automatické spuštění 4 instancí přijímacího software, každou pro jedno měřicí zařízení pro práci s 4 kanály (jednokanálovými zařízeními) najednou. Tyto instance aplikace jsou zobrazovány jako samostatná okna, která jsou spravována FVWM. Tento manažer oken se přizpůsobuje úpravou konfiguračního souboru. Cílem bylo přizpůsobit ho pro současnou práci s přijímacím softwarem. Modifikace zahrnují automatické spuštění instancí aplikace na určité stránce virtuální plochy, každé okno má upravený vzhled a definovanou maximální velikost, aby na obrazovku vešla všechna. Pak byla přidána tlačítka pro zavření všech oken na aktuální ploše, vypnutí Raspberry Pi a ruční spuštění určitého počtu instancí nebo konkrétního kanálu, pokud nejsou potřeba všechny 4. Každá instance má stejné nastavení režimu, používají jeden stejný soubor se vstupními nastaveními, ale data ukládají do samostatných záznamů, které se liší poslední číslicí. Díky své konfigurovatelnosti je FVWM ideálním nástrojem pro práci s více instancemi aplikací současně. Umožňuje si přizpůsobit pracovní prostředí dle svých potřeb a preferencí, a taky dává prostor pro další vývoj.



Obr. 4.4: Screenshot spuštěných přijímacích programů za využitím FVWM

## 4.2 Hardware

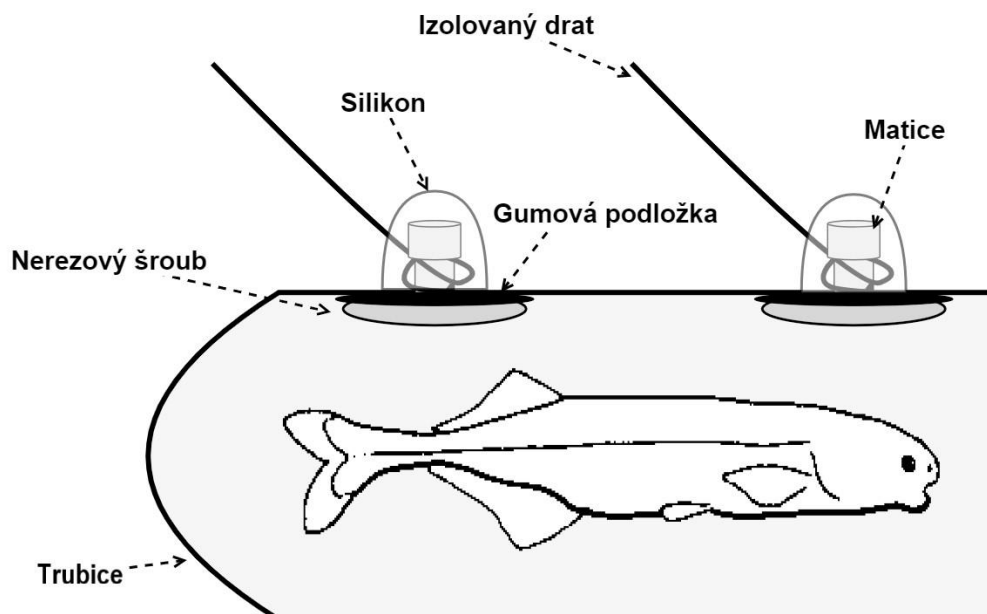
V této podkapitole se zaměřím na výslednou hardwarovou složku systému pro vícekanálový záznam EOD. Podle návrhu jsem realizoval snímací elektrody pro zachycení elektrických impulzů ryb, jedнокanálové měřicí EOD zařízení s využitím připraveného konstrukčního řešení a celý systém s jednodeskovým počítačem Raspberry Pi jako vestavenou řídicí jednotku. Ukončím tuhle podkapitulu popisem finální realizace přenosného zařízení pro vícekanálový záznam EOD u ryb čeledi Mormyridae.

### 4.2.1 Snímací elektrody

V rámci této práce byla zvolena neinvazivní metoda snímání EOD u ryb. V první řadě jsem se zamyslel nad materiálem samotné elektrody, která bude ve vodě a v blízkosti ryby. Jedním z nejlepších materiálů, které vedou elektrický proud a současně neoxidují, je zlato. Samozřejmě mít čistě zlatou elektrodu je ekonomicky nepraktické, ale pozlacený kov, jako například mosaz, by byl vhodný. Ale tento nápad musel být odložen, protože v železářství nejde najít nic takového a jedinou cestou k pozlacení by bylo užití speciálních chemických přípravků, které se za přijatelnou cenu prodávají pouze ve velkém objemu. Proto jsem zvolil dostupnější a jednodušší variantu – nerezovou ocel.

Dále jsem vybíral materiál akvarijní trubice, do které budou nainstalovány snímací elektrody a ve které bude nacházet ryba většinu času. Otestoval jsem dva materiály: PVC a keramika. PVC trubky jsou dostupnější než keramické, které se musely shánět ve specializovaných obchodech. S plastem se také mnohem lépe pracuje (řezání, vrtání otvorů), což bylo u keramických trubek vždy rizikem, protože někdy docházelo k jejich štěpení. Plastové trubky lze také natřít libovolnou barvou a druhý otvor jde kdykoliv zakrýt gumovou zátkou vhodné velikosti, aby nebyla průchozí. V takové trubici je ryba vždy otočena stejným směrem vzhledem k snímacím elektrodám, ocas je v hloubce trubice a hlava v blízkosti výstupu. Díky tomu EOD signály nejsou invertovány, a stále mají stejný průběh s první pozitivní fází a za ní následující negativní. Pro finální verzi používám právě PVC trubky.

Snímací elektrodu tvoří nerezový šroub s hladkou půlkulatou hlavou, aby se ryba nemohla poškrábat. Šroub spolu s gumovou podložkou, která kompenzuje nerovnosti trubky a zlepšuje izolaci, vkládá se do otvoru tak, aby uvnitř trubice zůstala jen jeho hlava. Z vnější části je na šroub nasazeno lisovací oko s připájeným drátem, místo připájení je izolováno voděodolným lepidlem Chemopren a smršťovací bužírkou, a vše je upevněno maticí. Poté jsou všechny kovové části na vnější straně trubky zality sanitárním silikonem.



**Obr. 4.5:** Schéma konstrukce snímacích elektrod v akvarijní trubici

Referenční elektroda je tvořena podobným způsobem. Kousek nerezového nýtu je připájen ke kabelu a místo spojení je izolováno voděodolným lepidlem Chemopren a smršťovací bužírkou.

Pak pro připojení elektrod k měřicímu zařízení byl použit 3,5mm stereo konektor Jack. Stereo, protože je třeba připojit tři kabely od tří elektrod (dvě snímací v trubici a jedna referenční). Použitím tohoto konektoru je připojení elektrod mnohem jednodušší a pohodlnější.

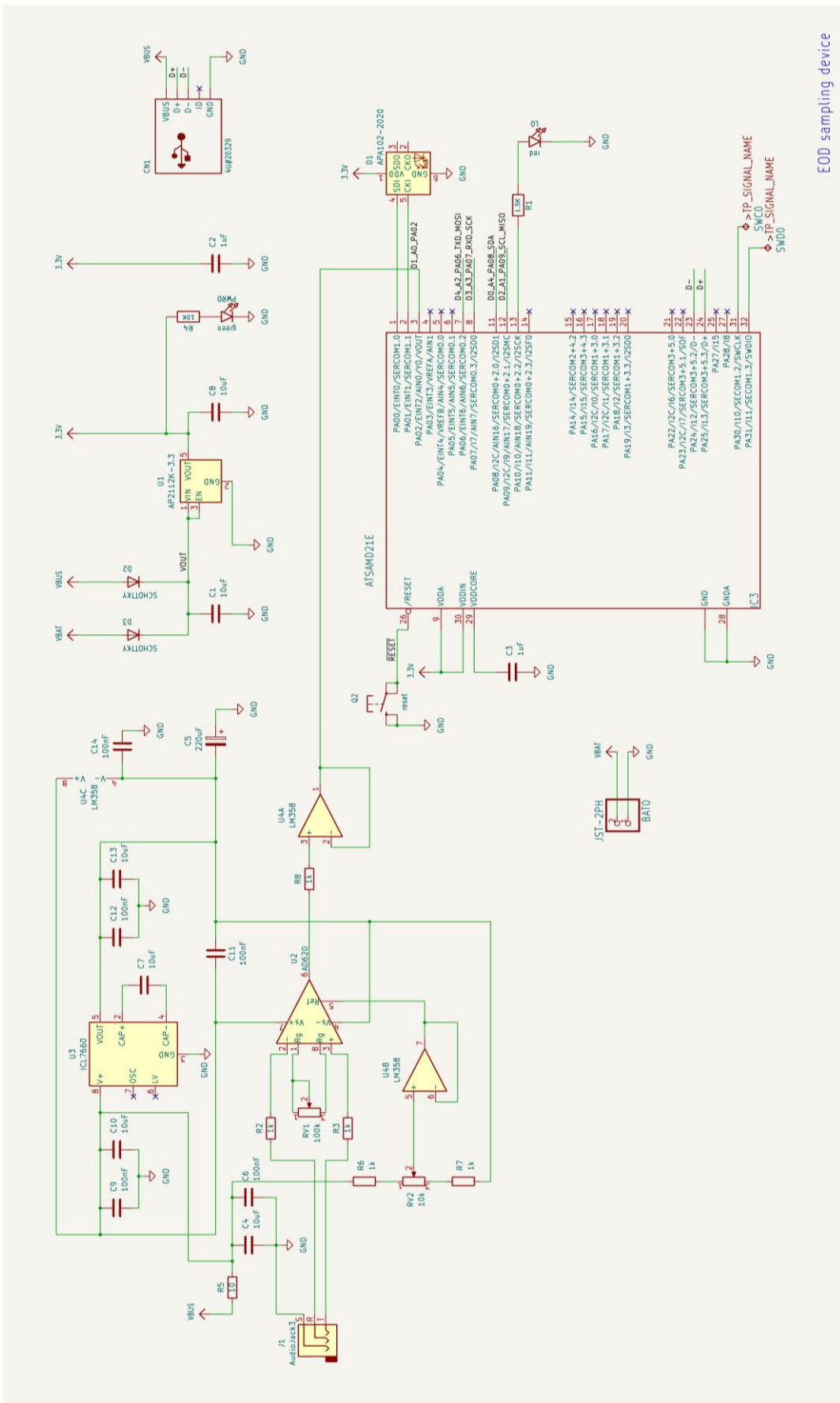
Tímto způsobem byly realizovány všechny snímací elektrody pro přenosné zařízení pro vícekanálový záznam EOD. Jejich výsledný vzhled a schéma konstrukce elektrod lze najít na obrázcích 4.5, 4.6.



**Obr. 4.6:** Trubka s nainstalovanými elektrodami, referenční elektroda a konektor Jack pro jejich připojení

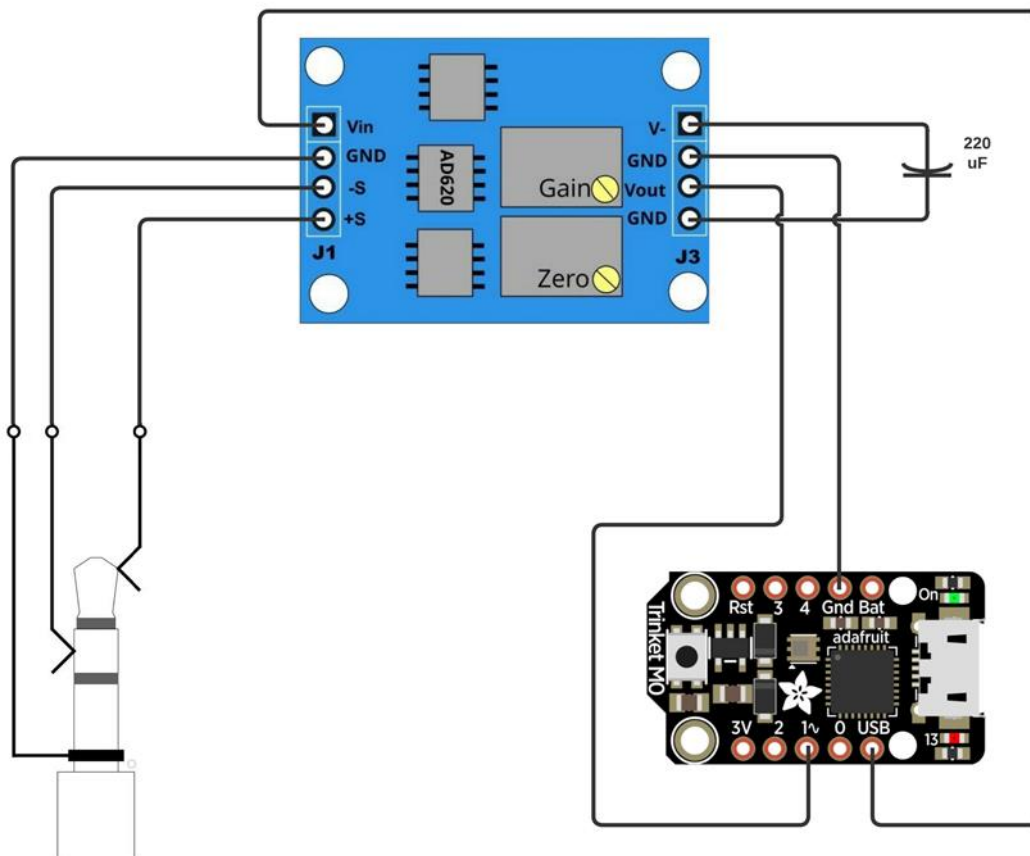
## 4.2.2 Měřicí EOD subsystém

Měřicí EOD subsystém se skládá z jednobanálních měřicích zařízení (jedno zařízení pro každý kanál), ke kterým se připojují jednotlivé trubky se snímacími elektrodami. Měřicí zařízení bylo již navrženo a popsáno v podkapitole 3.3, a zde se soustředím na jeho realizaci. Pro rekapitulaci shrnu, že samotné zařízení se skládá ze tří hlavních částí: modul s přístrojovým zesilovačem, mikrokontrolér Adafruit Trinket M0, stereo zásuvka Jack. K přístroji je třeba připojit tři elektrody, k čemuž je ideální konektor Jack – spolehlivý a snadno použitelný. Dále následuje Modul s přístrojovým zesilovačem AD620, u kterého nastavením vestavěných potenciometrů lze nastavovat offset a zesílení až na 1000násobek. Kromě toho AD620 má široký rozsah napájecího napětí (+/- 2,3 V až +/-18 V) [14]. Kvůli tomu, že AD620 vyžaduje kladné i záporné napájecí napětí, v modulu je využíván CMOS napěťový převodník ICL7660 pracující na principu nábojové pumpy. Ten převodník provádí převody napájecího napětí z kladného na záporné pro vstupní rozsah +1,5 V až +10,0 V, což vede ke komplementárním výstupním napětím -1,5 V až -10,0 V [18]. K modulu s přístrojovým zesilovačem byl ještě přidán filtrační kondenzátor s kapacitou 220  $\mu\text{F}$  pro vyrovnání napájecích špiček. Následuje mikrokontrolér Adafruit Trinket M0 postavený na ATSAM21. SAM D21/DA1 je řada mikrokontrolérů s nízkou spotřebou energie, které používají 32bitový procesor Arm® Cortex®-M0+ a mají do 256 KB Flash a 32 KB SRAM, pracují na maximální frekvenci 48 MHz a nabízí následující funkce: 12kanalový řadič přímého přístupu do paměti (DMA), programovatelný řadič přerušování, 32bitové hodiny reálného času (RTC), do pěti 16bitových časovačů (TC) [19]. Schéma vnitřní struktury součástí měřicího EOD zařízení a jejich propojení je uvedena na obrázku 4.7. Všechny tyto komponenty jsou zapouzdřeny v plastové krabici. Její rozměr je hlavně ovlivněn výškou víceotáčkových trimrů modulu s přístrojovým zesilovačem, jinak by šlo použít krabici mnohem menší. Do krabice jsem udělal dva otvory jeden pro vstup (Jack 3,5mm) druhý pro výstup (mikro USB). Pro jednodušší upevnění ke krabici se používá Jack zásuvka do panelu, ostatní součástky jsou připevněny tavnou pistolí. Komponenty jsou propojeny obyčejnými půlmilimetrovými dráty (schéma propojení komponent obr. 4.8). Po sestavení a nahrání firmwaru na měřicí zařízení je třeba ještě provést kalibraci a pomocí vestavěných trimrů nastavit požadované zesílení a offset vstupního signálu. Kalibrace se provádí tak, že se zařízení připojí k počítači s přijímacím softwarem, funkčním generátorem na vstup zařízení bude vyslán sinusový signál, který má amplitudu 300 mVpp a frekvenci 1 Hz. Účelem nastavení trimrů, aby v okně aplikace byla výstupní sinusoida zobrazena správně: celá, neoříznutá, uprostřed okna. Realizace měřicího EOD subsystému je důležité pro úspěšné měření signálů ryb čeledi Mormyridae, protože umožňuje získání kvalitních a přesných dat z elektrod. Příklad realizovaného jednobanálního měřicího EOD zařízení lze najít na obrázku 4.9.



EOD sampling device

Obr. 4.7: Schéma vnitřní struktury součástí měřičiho EOD zařízení a jejich propojení



**Obr. 4.8:** Schéma propojení součástek měřicího EOD zařízení

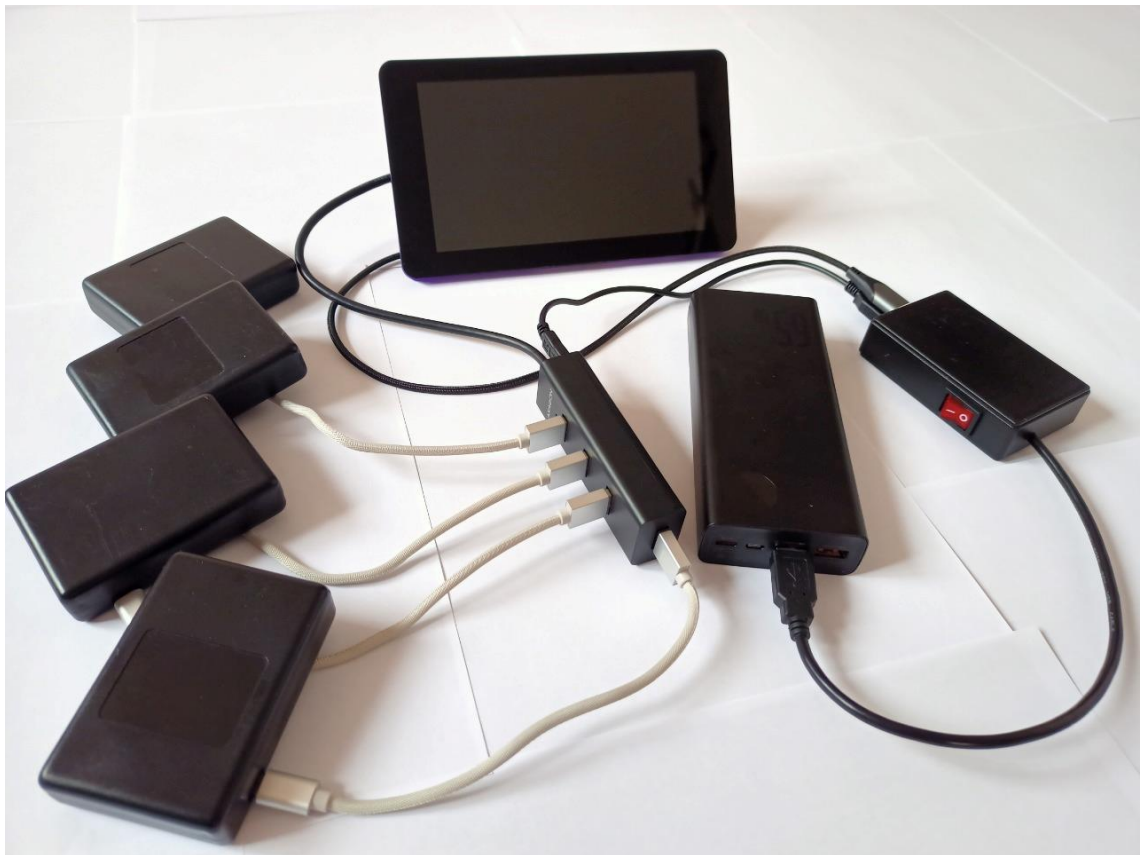


**Obr. 4.9:** Realizované jednonálové měřicí EOD zařízení



### 4.2.3 Celý systém

Podle návrhu uvedeném v podkapitole 3.3.3 systém pro vícekanálové měření EOD signálů u ryb čeledi Mormyridae vyžaduje: trubici se snímacími elektrodami, několik jednobanových zařízení pro měření EOD (dle požadovaného počtu kanálů), která budou přes USB hub připojená k počítači, sloužícím pro vizualizaci a záznam naměřených dat. Při realizaci toho návrhu musím brát v úvahu požadavky na kompletní zařízení uvedené v zadání práce. Systém musí být schopen dlouhodobému vícekanálovému snímání EOD v laboratorních i terénních podmínkách tj. mít kompaktní přenosné provedení bez nutnosti připojení externího PC, zapouzdření s krytím minimálně IP63 s možností bateriového napájení; Měřicí subsystém zařízení umožní připojení nejméně 4 bipolárních EOD kanálů; Jako vestavěná řídicí jednotka může být použito Raspberry Pi 4 s dotykovým displejem, který umožní zobrazení EOD včetně výpočtu jeho vybraných parametrů v reálném čase a jejich záznam na vestavěnou SD kartu pro následnou analýzu.



**Obr. 4.10:** Realizované zařízení pro vícekanálový záznam EOD u ryb čeledi Mormyridae (nezapouzdřené)

Ve finále jsem použil Raspberry Pi 3 Model B +, je starší, ale levnější, než Raspberry Pi 4. Jednodeskový počítač je namontován k dotykovému displeji velikosti 7', pro něj byl dokoupen rám, aby šlo displej postavit nebo držet v ruce. Pro chlazení Raspberry Pi byl nainstalován větráček, který je řízen aktuální teplotou procesoru. Na tomto počítači je rozběhnut operační systém Raspberry Pi OS Lite se správcem oken FVWM a přijímacím

softwarem. Měřicí EOD subsystem se skládá ze čtyř jednokanálových měřicích zařízení a USB hubu, přes který jsou propojeny s Raspberry Pi. Napájení toho subsystemu je taky zajištěno USB hubem, je aktivní a má na to vestavený konektor. Pro napájení celého systému se používá powerbanka s kapacitou 20000 mAh. Během jednohodinového testování se vybila zhruba na 5 %, což ukazuje, že by mohla vydržet alespoň 15 hodin nepřetržitého provozu. Bohužel powerbanka nemá vestavené tlačítko schopné ji zapínat a vypínat. Pro ten účel byl vyroben hlavní vypínač, který se v podstatě skládá z kabelu a kolébkového přepínače. Celý nezapouzdřený systém naleznete na obrázku 4.10. Všechny komponenty byly zapouzdřeny do ochranného kufru se certifikací IP 67, což znamená chránění proti ponoření do vody na 30 minut do hloubky 1 metru a před vniknutím prachu (obr. 4.11). Takhle ve výsledku bylo realizováno přenosné a autonomní zařízení schopné dlouhodobému vícekanálovému snímání EOD v laboratorních i terénních podmínkách.



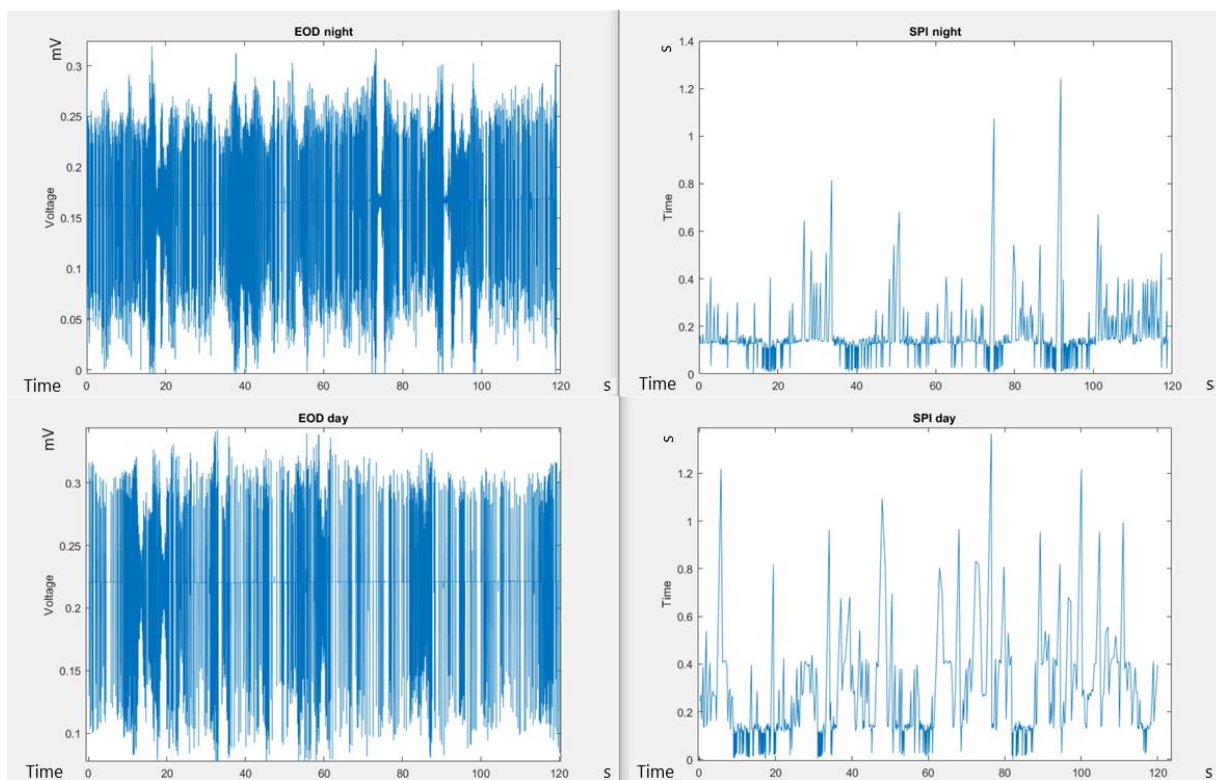
**Obr. 4.11:** Realizované přenosné zařízení pro vícekanálový záznam EOD u ryb čeledi Mormyridae

## 5 Experimenty

Ryby čeledi Mormyridae mají výrazně vyvinutý elektrický orgán, který slouží k orientaci v prostředí, komunikaci s ostatními jedinci a také k lokalizaci kořisti. Tento elektrický orgán se projevuje v podobě elektrických EOD signálů, které lze měřit a analyzovat. Na základě rešerše jsem dozvěděl, že největší rozdíly v průběhů EOD signálů lze pozorovat u ryb čeledi Mormyridae různých druhů, pohlaví, během období tréní a při sociální interakci s jinými rybami. Vzhledem k tomu, že mám malé dvacetilitrové akvárium, do kterého se vejde pouze jedna ryba (jinak by mezi rybami docházelo ke konfliktům o teritorium, které mohou ryby poškodit nebo dokonce přivést do záhuby), tyto rozdíly se mi nepodaří zaznamenat. Na druhé straně je známo, že ryby jsou citlivé na změny v okolním prostředí, jako jsou změny kvality vody, teploty, osvětlení a další faktory. Taky u některých ryb se liší EOD signály a jejich průběhy během dne a noci. Během aktivní fáze, tedy v noci, mají být EOD signály častější a silnější, což může být způsobeno zvýšenou aktivitou ryb v době, kdy loví a hledají kořist. Naopak během odpočinkové fáze, tedy ve dne, se EOD stávají méně frekventovanými. Také díky parametru SPI (sekvence pulzních intervalů), což je časový interval mezi signály, je možné zaznamenat změny v chování ryby. Změny v hodnotách SPI jsou pozorovatelné například při obraně teritoria, hrozbě nebo při páření.

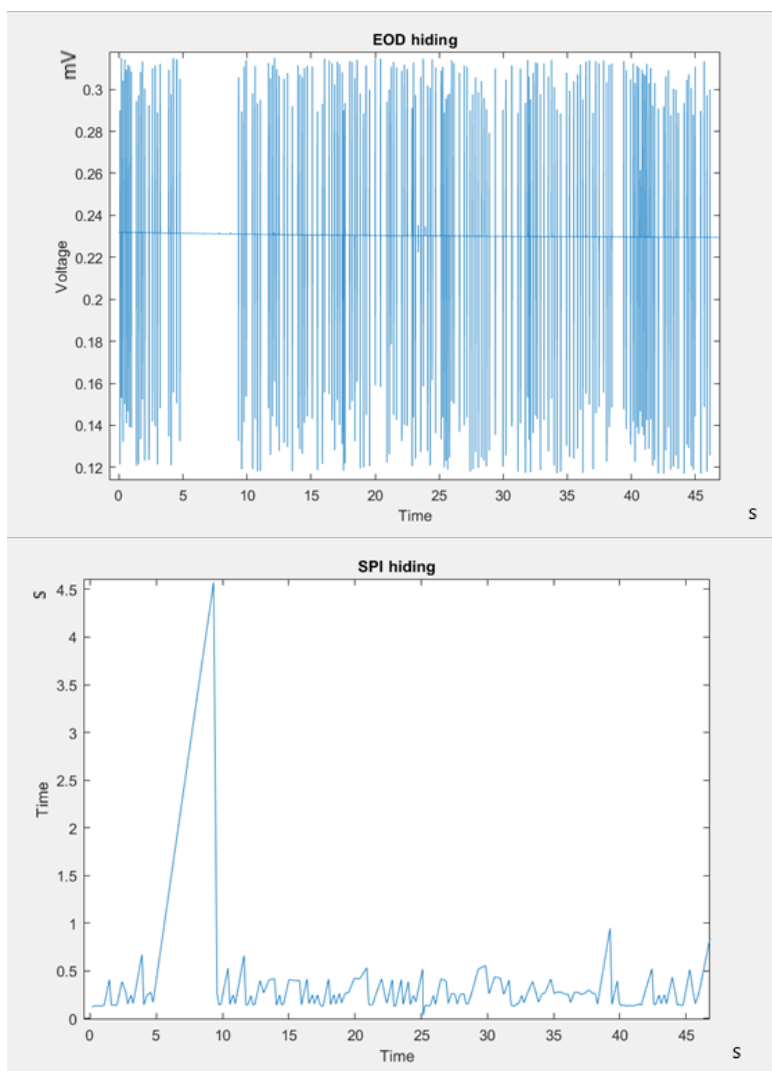
V této kapitole se budu zabývat experimenty, které byly provedeny na rybách čeledi Mormyridae, kde jsem měřil a porovnával průběhy a parametry EOD signálů v různých podmínkách. Cílem těchto experimentů bylo zjistit, jak se změny prostředí odrážejí v průběhu EOD signálů ryb. Budu se zabývat různými faktory, jako jsou denní období, osvětlení, cirkadiální rytmus a další. Tyto experimenty poskytují důležité informace o chování a fyziologii těchto ryb a v mé práci jsou použity pro ověření funkce a použitelnosti konstruovaného zařízení.

Cílem prvního experimentu je pozorovat a potvrdit rozdíl elektrické aktivity a EOD signálů mezi dnem a nocí. K tomu byla změřena pilotní data, přičemž každý ze záznamů trval dvě minuty a byl pořízen v době od 14:00 do 15:00 ve dne a od 02:00 do 03:00 v noci. Z důvodu neustálého pohybu ryby v akvarijské trubce není možné přesně určit amplitudy signálů, ale porovnání tohoto parametru ukázalo, že u této konkrétní ryby, kterou jsem měl pro experimenty, není pozorovatelný výrazný rozdíl v amplitudě mezi dnem a nocí. Dalším parametrem je doba trvání EOD signálů. Zde už lze též s jistotou říci, že se neliší, jak ve dne, tak v noci jeden průběh EOD trvá přibližně 1 milisekundu. Kde ale šlo pozorovat rozdíl, byla celková elektrická aktivita ryby. Počet EOD signálů se značně liší: v noci, kdy je ryba nejaktivnější, bylo zaznamenáno mnohem více signálů než ve dne. Byla vypočtena průměrná hodnota frekvence výskytu EOD signálů za sekundu, tak během dne tato hodnota činí 4.3 signálu za sekundu, a v noci 6.9, což představuje 60% nárůst v porovnání s denní aktivitou. To potvrzuje i parametr SPI, který byl také sledován, jehož hodnoty byly ve srovnání s denními často menší, což vypovídá o krátkém časovém intervalu mezi signály. Tyto výsledky ukazují, že chování a aktivita ryb čeledi Mormyridae se významně liší mezi dnem a nocí, že tyto rozdíly mohou být pozorovány pomocí EOD signálů a zkonstruované zařízení tyto rozdíly úspěšně zachytí.



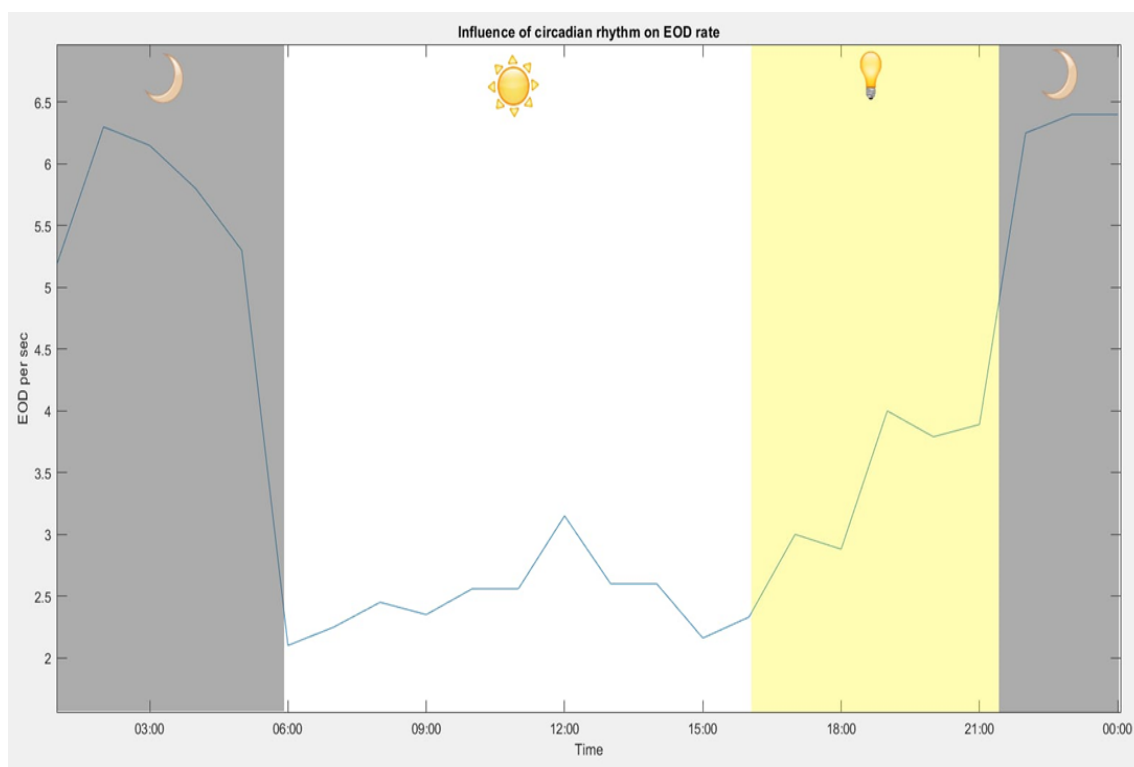
**Obr. 5.1:** Porovnání EOD signálů mezi dnem a nocí

Další experiment se zaměřil na sledování specifického chování ryby za využitím parametru SPI a jeho vzorů, které jsou uvedeny v druhé kapitole, kde je tento parametr podrobněji popsán. Pro to jsem potřeboval vyvolat u ryby nějaké konkrétní chování nebo stav, například pocit nebezpečí, který lze získat pohybem trubice s rybou. Ryby mají různé způsoby, jak reagovat na nebezpečí, například se mohou schovat nebo se snažit uniknout. V tomto případě bylo výsledkem schování ryby v trubici, zastavení pohybu a pád na dno na břicho. Podařilo se mi získat data, kdy ryba projevovala takové chování po dobu 45 sekund (viz obr. 5.2). Okamžitě upoutá pozornost zóna úplného „ticha“, kde ryba po dobu 4.5 sekund neposílá žádný EOD signál. To je charakteristický rys takového stavu, který odpovídá fázovému vzoru SPI "cessations" (zastavení) (obr. 2.4). Dále jsem pozoroval, že amplitudy signálů byly ustálenější, což je způsobeno tím, že ryba se nehýbala. Obecně platí, že signály byly uspořádané poměrně rovnoměrně, s výjimkou zóny "ticha". Celkově lze tedy říci, že experiment úspěšně vyvolal konkrétní stav u ryby a ukázal, jak je možné využít parametr SPI k analýze chování ryb a jak může být užitečný při studiu reakcí ryb na různé stimuly.



**Obr. 5.2:** Grafy EOD a SPI při schovávání ryby

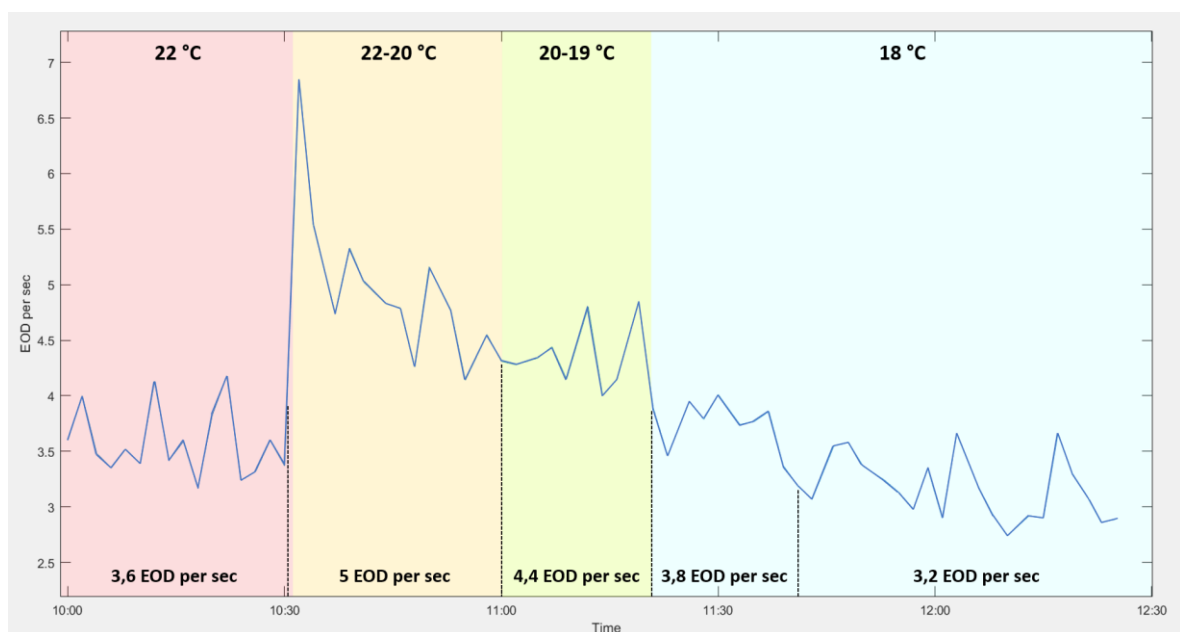
Na základě předchozích experimentů jsem ověřil, že existuje velký rozdíl v elektrické aktivitě ryby mezi dnem a nocí. Tento experiment se zaměřil na vliv cirkadiálního rytmu na elektrickou aktivitu ryby. Současná verze měřicího systému umožňuje nejen souběžné měření na čtyřech kanálech, ale také dlouhodobé snímání signálů. Proto jsem dokázal provést monitoraci s cílem zachytit vliv cirkadiálního rytmu na parametry EOD a konkrétně na frekvenci výskytu signálů za sekundu – tj. na elektrickou aktivitu. Monitorování probíhalo po dobu 24 hodin, poté byla data analyzována a pro každou hodinu byly vypočteny průměrné parametry, které jsou uvedeny v grafu (obr. 5.3). Tento experiment zase potvrzuje, že aktivita signálů je závislá na denním období. V noci byly zaznamenány největší hodnoty, což odpovídá nočnímu způsobu života ryby. Naopak během dne byla zaznamenána nejnižší aktivita. Taky je patrný vliv okolního osvětlení na parametry EOD signálů, které jsou minimální při přirozeném osvětlení a pak večer při umělém osvětlení začínají růst. Teplota vody se v tomto experimentu neměnila, to ale neznamená, že nemá žádný vliv na parametry EOD. V přírodních podmínkách jsou teplota vody a okolní osvětlení neoddělitelně spjaty, takže lze předpokládat, že při přirozené změně teploty vody během dne by došlo k podobným změnám parametrů jako v tomto experimentu [20], [21]. Celkově tedy tento experiment ukazuje, že cirkadiální rytmus může hrát důležitou roli v elektrické aktivitě ryby a že je třeba brát v úvahu i další faktory jako teplotu a okolní osvětlení.



**Obr. 5.3:** Graf elektrické aktivity ryby během 24 hodin

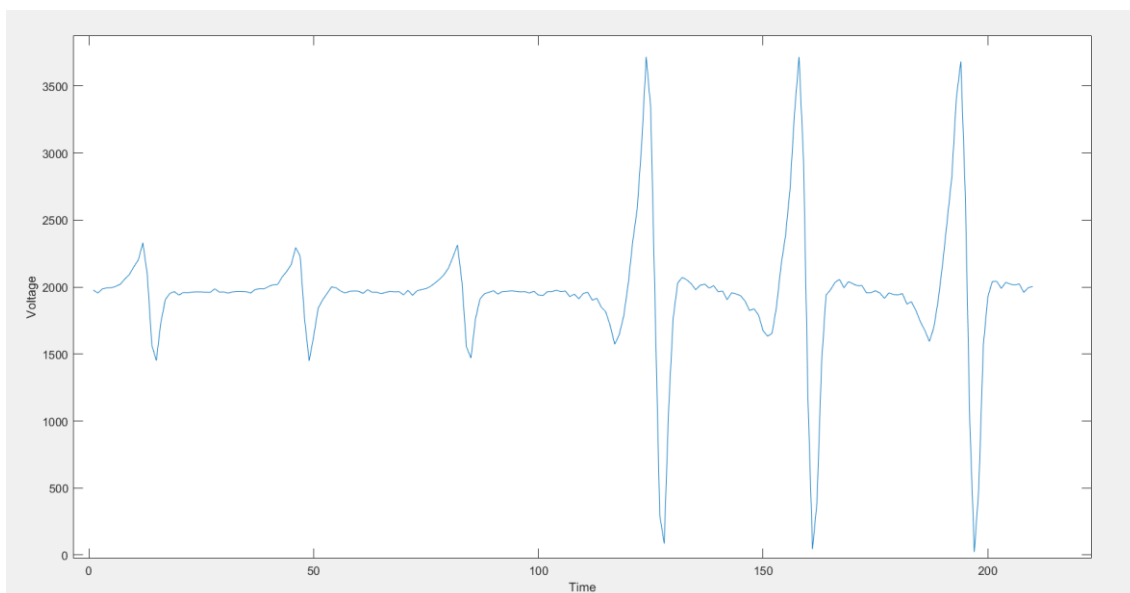
Cílem tohoto experimentu bylo ověřit vliv teploty vody na elektrickou aktivitu ryby a zaznamenat její okamžitou změnu při poklesu teploty. Jde o známý fakt, že teplota vody ovlivňuje fyziologické procesy ryb a může mít vliv na jejich chování. To je důvodem, proč očekávám přeměnu frekvence výskytu EOD signálů, na kterou se zaměřím při analýze dat. Experiment bude spočívat v postupném snižování teploty vody v akváriu s rybou do 18 stupňů Celsia a zaznamenání změn pomocí zkonstruovaného zařízení.

Výsledek je zobrazen v podobě grafu na obrázku 5.4. Osa x představuje čas, y frekvenci výskytů EOD za sekundu. Barvou je znázorněna teplota vody, která se měnila od 22 do 18 °C. Taky je vypsán průměrný počet výskytů EOD za časové období mezi přerušovanými čarami. Normální teplota vody v akváriu je 22 °C a je vidět že než se začalo její snižování, elektrická aktivita ryby byla víceméně konstantní a frekvence výskytu EOD se pohybovala mezi 3,3 a 4,2 EOD za sekundu. Poté došlo k poměrně rychlému poklesu teploty, která se za půl hodiny snížila o 2 stupně Celsia. Tomu odpovídá okamžitá reakce ryby a náhlý vzrůst její elektrické aktivity, která ve špičce dosáhla 6,9 EOD za sekundu. Potom ale následovalo pomalé snížení aktivity a ryba se adaptovala na teplotu. Za hodinu teplota klesla do požadovaných 18 °C a zůstávala stejná. Frekvence výskytu EOD přitom dosáhla minimálních hodnot právě když teplota vody se ustálila, a tak její průměrná hodnota byla 3,2 EOD za sekundu, což ve výsledku je menší než původní při 22 °C. Při analýze dat jsem také spočítal průměrnou amplitudu EOD signálů ve vybraných časových intervalech. Nepodařilo se mi zaznamenat závislost amplitudy na teplotě, předpokládám že k tomu je potřeba větší změny teploty a přesnější metoda měření. Jinak fakt toho že se snížením teploty snižuje se i frekvence EOD potvrzuje dřívější studie [22]. Tento experiment potvrdil vliv teploty vody na elektrickou aktivitu ryby čeledi Mormyridae a jeho výsledek dokázal znázornit reakci ryby a její přizpůsobení teplotě.



**Obr. 5.4:** Graf elektrické aktivity ryby během snižování teploty vody v akváriu

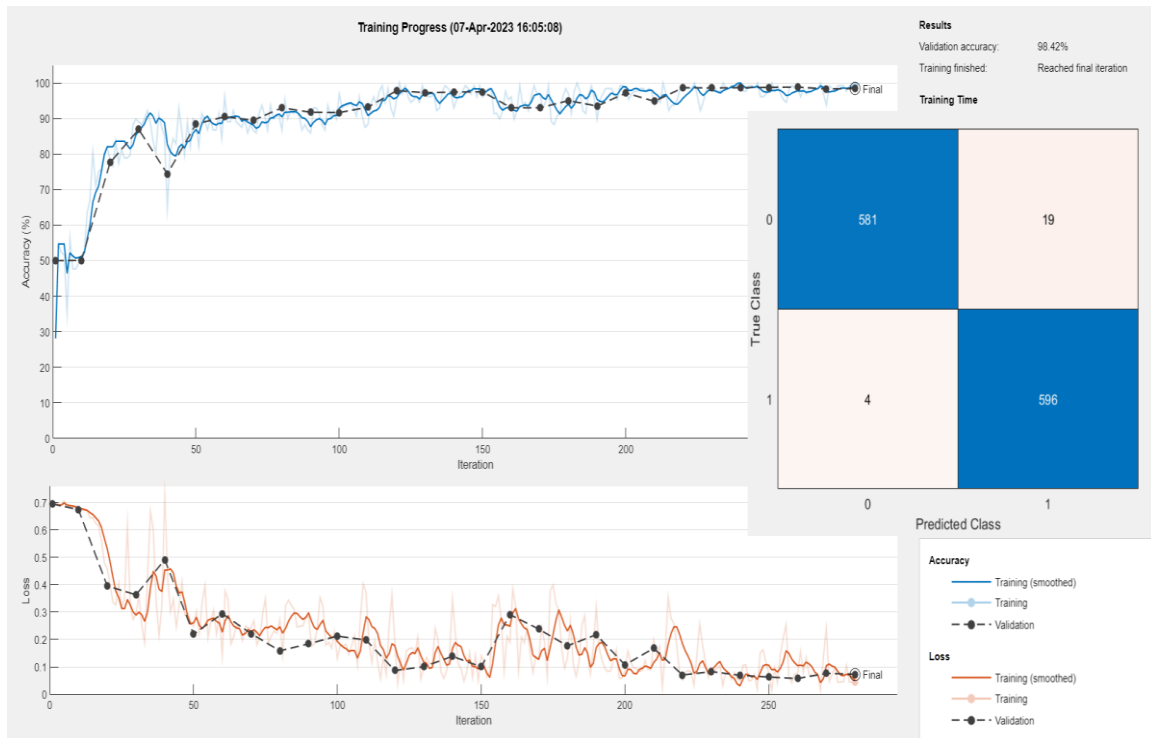
Tento experiment je zaměřen na ověření možnosti využití neuronové sítě pro automatické rozlišení EOD signálů různých druhů ryb čeledi Mormyridae. Na jedné straně je známo, že EOD různých druhů se liší a tyto signály lze využít i pro určení druhu ryby. Na druhé straně neuronové sítě se teď aktivně vyvíjí a technologie pro jejich tvorbu jsou hodně dostupné. Proto v rámci experimentu vytvořím klasifikační neuronovou síť, která bude schopna rozlišit signály dvou různých druhů ryb a správně je identifikovat.



**Obr. 5.5:** Porovnání průběhů EOD dvou druhů ryb čeledi Mormyridae: *Petrocephalus simus* a *Brienomyrus brachyistius*

K tomu budou použity EOD signály dvou různých druhů ryb čeledi Mormyridae: *Petrocephalus simus* a *Brienomyrus brachyistius*. Tyto dva druhy jsou vybrány z důvodu svého odlišného EOD signálu (obr. 5.5). Experiment se skládá ze tří hlavních částí: sběru dat, trénování neuronové sítě a testování přesnosti sítě. Pro sběr dat jsou použita zařízení pro měření EOD signálů ryb, které jsou následně předzpracovány. Předzpracování signálů zahrnuje přidání labelů podle druhu, normalizace, rozdělení na trénovací, testovací a validační množinu. Ve výsledku dostávám dataset velikosti 6000 EOD, 3000 pro každý druh. Pro experiment je aplikována vícevrstvá neuronová síť s několika skrytými vrstvami a pro vytvoření neuronové sítě jsou používány trénovací a validační množiny. Po dokončení trénování sítě je testována na nových datech, které nebyly použity během trénování. Výsledky ukazují, že síť je schopna správně rozlišit EOD signály obou druhů ryb s přesností 98 % (obr. 5.6). Tento experiment potvrzuje potenciál využití neuronových sítí a otevírá možný budoucí směr vývoje zařízení pro rozpoznávání více druhů ryb čeledi Mormyridae na základě jejich unikátních EOD signálů.





**Obr. 5.6:** Průběh trénování neuroní sítě a výsledky testování

Závěrem této kapitoly lze konstatovat, že provedené experimenty na zapůjčených exemplářích ryb čeledi Mormyridae a ověření zařízení byly úspěšné a potvrdily funkčnost a spolehlivost navrženého vícekanálového měřicího systému. Výsledky experimentů ukázaly, že navržený měřicí systém je vhodný pro měření a detekci EOD signálů u ryb čeledi Mormyridae a může být použit pro další výzkum v této oblasti.

## 6 Diskuze

Jsem rád, že se mi podařilo realizovat toto zařízení pro vícekanálový záznam EOD u ryb čeledi Mormyridae. I když bylo dost neznámého, dotkl jsem se nových sfér a ponořil se hlouběji do tohoto tématu. Všechno to je na jedné straně díky základům a zkušenostem z minulých semestrálních projektů, na druhé straně díky vedoucímu, jeho věnovanému času a poskytnutým materiálům. V rámci této práce jsem mohl věnovat jak teorii a analýze tak i vývoji a realizaci. Samozřejmě budu v tom pokračovat, jsou ještě věci, které chci vylepšit.

Vylepšení by se mohlo týkat například odstranění chyb komunikace mezi měřicím zařízením a Raspberry Pi, když na něm běžící přijímací software dostává jiná data, než očekává a kvůli tomu se do záznamu mohou dostat chyby nebo vzorek může chybět. Pak bych ještě chtěl zapracovat na konfiguraci FVWM a udělat více uživatelsky přívětivý UI, odstranit některé funkce FVWM, nepotřebné pro práci s aplikací. Dál najít a odstranit příčinu občas neodpovídající dotykové obrazovky, což je momentálně řešeno restartem systému nebo použitím myši. Následně lépe zapouzdřit Raspberry Pi a změnit celkové zapouzdření zařízení na menší a kompaktnější, nebo nechat aktuální rozměr, ale upravit, aby se do kufru vešly taky trubky se snímacími elektrodami. Poslední, ale ne podle důležitosti, je přidání LED diody k hlavnímu vypínači pro indikaci zapnutého/vypnutého proudu.

Existuje taky velký prostor pro další vývoj zařízení. Jeden z takových by mohl směřovat ke zdokonalení detekce a rozpoznání EOD signálů různých druhů Mormyridae. Výsledky experimentů z kapitoly 5 ukázaly, že neuronové sítě jsou schopny s dostatečně velkou přesností klasifikovat EOD signály jednotlivých druhů. Rozšíření funkcionality zařízení o schopnost říct podle EOD jaký druh ryby aktuálně měří by mohlo pomoci při práci v terénu. Dalším směrem vývoje by mohlo být vylepšení přenosu dat mezi měřicím zařízením a Raspberry Pi, například pomocí bezdrátového připojení, což by umožnilo větší mobilitu a flexibilitu používání zařízení v terénu.

## 7 Závěr

Výsledkem této práce je funkční zařízení pro dlouhodobé vícekanálové snímání EOD v laboratorních i terénních podmínkách. Součástí zařízení je měřicí subsystém umožňující připojení 4 bipolárních EOD kanálů se vstupním rozsahem 10 až 200 mV a vzorkovací frekvencí 40 kHz na kanál. Digitalizace EOD je realizována pomocí mikrokontroléru ATSAM21, vybaveného příslušným firmware, který zajišťuje vzorkování, automatickou detekci EOD s nastavitelnými parametry a přenos signálu do řídicí jednotky. Jako vestavěná řídicí jednotka je použito Raspberry Pi 3 Model B+ s dotykovým displejem. Raspberry Pi dovoluje zobrazení EOD včetně výpočtu jeho vybraných parametrů v reálném čase a jejich záznam na vestavěnou SD kartu pro následnou analýzu. Celé zařízení má kompaktní přenosné provedení bez nutnosti připojení externího počítače, zapouzdření s krytím IP67 a napájení přes powerbanku. Funkčnost zařízení byla ověřena na zapůjčených exemplářích ryb čeledi Mormyridae prostřednictvím experimentů zaměřených na stabilitu a opakovatelnost měření EOD za různých podmínek jako změny osvětlení, teploty, vliv cirkadiálních rytmů. Podle mého názoru byly cíle a zadání mé bakalářské práce splněny.

## Seznam použité literatury

- [ VON DER EMDE, G. Active Electroreception: Vertebrates. *Encyclopedia of Animal Behavior*. Elsevier, 2010, 16-23. ISBN 9780080453378. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-045337-8.00322-3
- [ MARKHAM, Michael, M. MCANELLY, Philip STODDARD, Harold ZAKON a Leonard MALER. Circadian and Social Cues Regulate Ion Channel Trafficking. *PLoS Biology*. 2009, **7**(9), 14. ISSN 1545-7885. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pbio.1000203
- [ POULET, James a Berthold HEDWIG. New insights into corollary discharges mediated by identified neural pathways. *Trends in Neurosciences*. 2007, **30**(1), 14-21. ISSN 01662236. Dostupné z: doi:10.1016/j.tins.2006.11.005
- [ FROESE, Rainer a Daniel PAULY, ed. Family Mormyridae: Elephantfishes. In: *FishBase* [online]. 2023 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://fishbase.mnhn.fr/Summary/FamilySummary.php?id=40&lang=english>
- [ FUKUTOMI, Matasaburo a Bruce CARLSON. Signal Diversification Is Associated with Corollary Discharge Evolution in Weakly Electric Fish. *The Journal of Neuroscience*. 2020, **40**(33), 6345-6356. ISSN 0270-6474. Dostupné z: doi:10.1523/JNEUROSCI.0875-20.2020
- [ ZAKON, H.H. a G.T. SMITH. Weakly Electric Fish: Behavior, Neurobiology, and Neuroendocrinology. *Hormones, Brain and Behavior*. Elsevier, 2009, 611-639. ISBN 9780080887838. Dostupné z: doi:10.1016/B978-008088783-8.00017-6
- [ NAGEL, Rebecca, Frank KIRSCHBAUM, Volker HOFMANN, Jacob ENGELMANN a Ralph TIEDEMANN. Electric pulse characteristics can enable species recognition in African weakly electric fish species. *Scientific Reports*. 2018, **8**(1), 1-12. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/s41598-018-29132-z
- [ MORITZ, TIMO, K. LINSENMAIR a GERHARD VON DER EMDE. Electric organ discharge variability of Mormyridae (Teleostei: Osteoglossomorpha) in the Upper Volta system. *Biological Journal of the Linnean Society*. 2008, **94**(1), 61-80. ISSN 00244066. Dostupné z: doi:10.1111/j.1095-8312.2008.00956.x

- [ 9] CARLSON, Bruce A. Electric signaling behavior and the mechanisms of electric organ discharge production in mormyrid fish. *Journal of Physiology-Paris*. 2002, **96**(5-6), 405-419. ISSN 09284257. Dostupné z: doi:10.1016/S0928-4257(03)00019-6
- [ 10] HackEEG: 8-32 channel TI ADS1299 Arduino shield for EEG, EMG, and EKG bio-signals acquisition. In: *Crowd Supply* [online]. 2019 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://www.crowdsupply.com/starcat/hackeeeg/>
- [ 11] HackEEG Python client library. In: *Hackeeeg-client-python* [online]. Seattle: Starcat LLC, 2019 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://hackeeeg-client-python.readthedocs.io/en/latest/>
- [ 12] PAUL, Christiane, Victor MAMONEKENE, Marianne VATER, Philine FEULNER, Jacob ENGELMANN, Ralph TIEDEMANN a Frank KIRSCHBAUM. Comparative histology of the adult electric organ among four species of the genus *Campylomormyrus* (Teleostei: Mormyridae). *Journal of Comparative Physiology A*. 2015, **201**(4), 357-374. ISSN 0340-7594. Dostupné z: doi:10.1007/s00359-015-0995-6
- [ 13] GOLUBTSOV, A. a A. ORLOV. Variation of electric organ discharge in *Mormyrus kannume* (Mormyridae) from south-western Ethiopia in relation to individual size, sex and reproductive status. *Journal of Ichthyology*. 2014, **54**(2), 177-185. ISSN 0032-9452. Dostupné z: doi:10.1134/S0032945214020039
- [ 14] AD620 datasheet. In: *Analog Devices* [online]. [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/AD620.pdf>
- [ 15] FRIED, Limor. Adafruit Trinket M0 manual. In: *Adafruit Industries* [online]. 2019, 2022-12-12 [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-trinket-m0-circuitpython-arduino.pdf>
- [ 16] MGRX a C graphics library. In: *Fgrim* [online]. [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://www.fgrim.com/mgrx/>
- [ 17] New to FVWM. In: *FVWM* [online]. [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://www.fvwm.org/Wiki/NewToFvwm/>
- [ 18] ICL7660, ICL7660A CMOS Voltage Converters. In: *Renesas* [online]. 2010 [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://www.renesas.com/in/en/document/dst/icl7660-datasheet>
- [ 19] SAM D21/DA1 Family. In: *Microchip* [online]. Chandler, Arizona, USA: Microchip Technology Inc., 2021 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z:

<https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/MCU32/ProductDocuments/DataSheets/SAM-D21-DA1-Family-Data-Sheet-DS40001882H.pdf>

- [ MUCHA, Stefan, Franziska OEHLERT, Lauren CHAPMAN a Rüdiger  
20] KRAHE. A Spark in the Dark: Uncovering Natural Activity Patterns of Mormyrid Weakly Electric Fish. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2022, **10**. ISSN 2296-701X. Dostupné z: doi:10.3389/fevo.2022.870043
- [ MIGLIARO, Adriana, Victoria MORENO, Paul MARCHAL a Ana SILVA.  
21] Daily changes in the electric behavior of weakly electric fish in nature persist in constant darkness and are socially synchronized. *Biology Open*. 2018, (7). ISSN 2046-6390. Dostupné z: doi:10.1242/bio.036319
- [ DUNLAP, K.D., G.T. SMITH a A. YEKTA. Temperature Dependence of  
22] Electrocommunication Signals and Their Underlying Neural Rhythms in the Weakly Electric Fish, *Apteronotus leptorhynchus*. *Brain, Behavior and Evolution*. 2000, **55**(3), 152-162. ISSN 0006-8977. Dostupné z: doi:10.1159/000006649