



**ČVUT**

ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE

**F3**

**Fakulta elektrotechnická  
Katedra teorie obvodů**

**Bakalářská práce**

# **Analýza EMG při hodnocení lokální fyzické zátěže**

**Tomáš Kysela**

**Lékařská elektronika a bioinformatika**

**Květen 2024**

**Vedoucí práce: Ing. Jaromír Doležal, Ph.D.**

**Draft: 10. 5. 2024**



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kysela**

Jméno: **Tomáš**

Osobní číslo: **503177**

Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**

Zadávací katedra/ústav: **Katedra teorie obvodů**

Studijní program: **Lékařská elektronika a bioinformatika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Analýza EMG při hodnocení lokální fyzické zátěže**

Název bakalářské práce anglicky:

**EMG analysis in the assessment of local physical load**

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je navrhnout a implementovat SW pro hodnocení lokální svalové zátěže v souladu se zavedenou metodikou v praxi. Práce má vést k přesnějším vyhodnocení při různých typech fyzických činností. Měření a vyhodnocení se pro účely pracovního lékařství řídí metodikou v Nařízení vlády č. 361/2007 Sb. Prostudujte aktuální stav problematiky měření a vyhodnocení lokální svalové zátěže v ergonomii. Navrhněte a realizujte vhodnou metodu (metody) pro analýzu EMG. Navrhněte experimentální měření opakujících se fyzických operací, prováděných horními končetinami. Měření realizujte pomocí dodaného HW zařízení SHIMMER. Otestujte navrženou metodu na měřených datech.

Seznam doporučené literatury:

Nařízení vlády č. 361/2007 Sb., dostupné online: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2007-361>

Tankisi, H. et al. Standards of instrumentation of EMG. Clinical

Neurophysiology 131(2020), 243-258, Elsevier.

<https://doi.org/10.1016/j.clinph.2019.07.025>

Ranaldi, S., De Marchis, C., S.Conforto. An automatic, adaptive, information-based algorithm for the extraction of the sEMG

envelope. Journal of Electromyography and Kinesiology 42 (2018) 1–9. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2018.06.001>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jaromír Doležal, Ph.D. CIIRC ČVUT v Praze**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **16.02.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

Ing. Jaromír Doležal, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Radoslav Bortel, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

**Draft: 10. 5. 2024**



## Poděkování / Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 10. 5. 2024

.....

## Abstrakt / Abstract

**Klíčová slova:**

**Keywords:**

**Title translation:** EMG analysis in  
the assessment of local physical load

## / Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Princip fungování EMG</b>	<b>2</b>
2.1 Neuromuskulární systém . . . . .	2
2.1.1 Kosterní svalstvo . . . . .	2
2.1.2 Motorické neurony . . . . .	3
2.1.3 Kontrakce a relaxace svalového vlákna . . . . .	3
2.2 Hardwarové zpracování sig- nálu EMG . . . . .	4
2.2.1 Elektrody . . . . .	4
2.2.2 zesilovač . . . . .	5
2.2.3 Filtry . . . . .	5
2.2.4 AD převodník . . . . .	5
2.3 Umístění elektrod . . . . .	6
2.3.1 Měření flexoru a exten- zoru předloktí . . . . .	6
2.3.2 Měření extenzorů zápěstí . . .	6
2.3.3 Měření flexoru zápěstí . . . .	7
<b>3 Legislativa v oblasti pra- covní ergonomie</b>	<b>8</b>
3.1 Česká republika . . . . .	8
3.2 Slovenská republika . . . . .	8
<b>4 Aktuální metodika měření</b>	<b>10</b>
4.1 Standardní postup pro pro- vádění měření . . . . .	10
4.2 Vyhodnocení měření . . . . .	11
<b>5 Návrh a provedení experimentu</b>	<b>13</b>
5.1 Příprava experimentu . . . . .	13
5.2 Experiment . . . . .	14
<b>6 Zpracování signálů</b>	<b>15</b>
6.1 Zpracování signálu z pří- stroje Shimmer . . . . .	15
6.2 Vytvoření histogramů . . . . .	16
<b>7 Závěr</b>	<b>19</b>
<b>Literatura</b>	<b>20</b>
<b>A Seznam použitých zkratk</b>	<b>21</b>

## Tabulky / Obrázky

<b>2.1</b> Typické hodnoty amplitudy, frekvencí BP a vzorkovací frekvence.....	<b>2.1</b> Schéma sarkomery .....
6	2
<b>3.1</b> Přípustné a průměrné hygienické limity energetického výdeje při práci s celkovou fyzickou zátěží u mužů.....	<b>2.2</b> Kontrakce svalového vlákna .....
8	3
<b>3.2</b> Přípustné a průměrné hygienické limity energetického výdeje při práci s celkovou fyzickou zátěží u žen .....	<b>2.3</b> Schéma umístění elektrod pro měření flexoru a extenzoru předloktí.....
8	6
<b>3.3</b> Průměrné hygienické limity pro směnové a minutové počty pohybů ruky a předloktí za průměrnou osmihodinnou směnu .....	<b>2.4</b> Schéma umístění elektrod pro měření extenzorů předloktí.....
9	7
<b>5.1</b> Harmonogram aktivit v experimentu.....	<b>2.5</b> Schéma umístění elektrod pro měření flexorů předloktí .....
14	7
	<b>4.1</b> Ukázka křivky v programu EMG Analyzer za užití přístroje EMG Holter .....
	11
	<b>4.2</b> Ukázka frekvenční analýzy v programu EMG Analyzer za užití přístroje EMG Holter .
	11
	<b>4.3</b> Ukázka výsledků měření v programu EMG Analyzer za užití přístroje EMG Holter .
	12
	<b>5.1</b> Schéma umístění elektrod při experimentu na dorzální straně .....
	13
	<b>5.2</b> Schéma umístění elektrod při experimentu na ventrální straně .....
	13
	<b>6.1</b> Surová data z přístroje Shimmer .....
	15
	<b>6.2</b> Signál filtrovaný pásmovou propustí.....
	16
	<b>6.3</b> Obálka filtrovaného signálu....
	16
	<b>6.4</b> Převzorkovaná obálka filtrovaného signálu.....
	17
	<b>6.5</b> Srovnání signálů mezi přístroji .....
	17
	<b>6.6</b> Histogram měření EMG .....
	18



# Kapitola 1

## Úvod

Nemoci z povolání způsobené dlouhodobým přetěžováním končetin tvořili v letech 2013 až 2020 30 %, v roce 2017 dokonce 42 %, hlášených nemocí z povolání. [1] Za účelem předcházení výskytů mimo jiné těchto zranění z povolání bylo vydáno Nařízení vlády č. 361/2007 Sb. Pro kontrolu pracovních procesů a jejich vyhovění legislativě se využívá přístroje EMG Holter se softwarovým zpracováním v programu EMG Analyzer, oboje od společnosti GETA Centrum s.r.o., která má v oblasti měření ergonomie práce na našem území prakticky monopol.

V první části je vysvětleno fungování přístrojů pro měření EMG. Nejdříve je vysvětleno fungování neuromuskulárního systému a následně jeho obecné zpracování.

V druhé části práce je vysvětleno stávající řešení od společnosti GETA a následně shrnuto dané Nařízení vlády.

Ve třetí části se pak zabýváme návrhem softwaru pro zpracování signálu z přístroje Shimmer. Nejdříve navrhujeme metodu zpracování, na jejímž konci máme stejné výsledky jako stávající řešení, aby šlo nový přístroj využít ve stávajících procesech měřících laboratořích. Následně se pokusíme nalézt nové informace za využití detailnějšího signálu z přístroje Shimmer, konkrétně detekci repetitivních vzorů a tedy opakujících se cyklů pohybu.

# Kapitola 2

## Princip fungování EMG

### 2.1 Neuromuskulární systém

Neuromuskulární systém je základem pohybového aparátu člověka. Patří do něj kosterní svalstvo a nervy, které je ovládají.

#### 2.1.1 Kosterní svalstvo

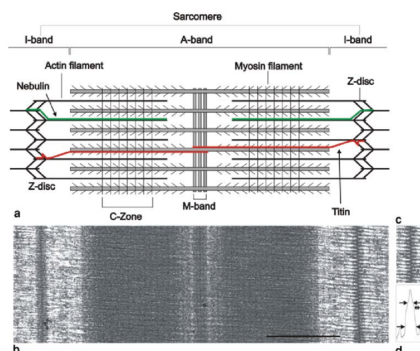
Každý sval se skládá ze svalových vláken, která jsou shlukována do svazků. Každý svazek je následně držen pojivovou tkání. Samotné svazky poté nejsou často vedeny pouze jedním směrem, nýbrž jsou různě pootočený tak, aby součet vektorů jejich sil dohromady tvořil požadovaný vektor.

Každé vlákno se následně skládá z ještě menších dílků zvaných myofibrily. Myofibrily jsou obaleny sarkoplazmatickým retikulem a jsou invaginovány T-tubulami. Každá myofibrila se následně skládá z tlustého a tenkého filamentu.

Tlustý filament je tvořen myosinem. Ten se skládá z šesti polypeptidů, kdy 2 tvoří jeden pár těžkých řetězců a 4 tvoří dva páry lehkých řetězců. Těžký řetězec je převážně stočen do alfa-šroubovice, kde tvoří ocásek myosinové molekule. Na konci každého z těžkých řetězců spolu s párem lehkých řetězců poté tvoří globulární myosinové hlavy.

Tenký filament se skládá převážně z aktinu. Aktin je v tenkém filamentu polymerizován do dvou vláken stočených do alfa-šroubovice. Na této šroubovici jsou místa k vázání myosinu. Tato místa jsou při relaxaci zakrytá tropomyosinem. Na něm jsou v pravidelných intervalech zavěšené komplexy troponinu. Jeho úkolem je při kontrakci navázat ionty vápníku, odstranit tropomyosin a dovolit navázání myosinových hlav na aktin.

Každá myofibrila je pruhované vlákno, ve kterém se jednotlivé sekce nazývají sarkomery. Ve střed sarkomery se vyskytuje A-pásmo. Zde se prolínají aktin a myosin. Ve středu A-pásma se nachází M-linie. Ty jsou tvořeny tmavě zbarvenými proteiny vázajícími jednotlivé molekuly myosinu k sobě. Na hranicích sarkomery pak leží I-pásma obsahující aktin. Uprostřed každého I-pásma se nachází Z-disk, který ohraničuje konce jednotlivých sarkomer. [2]



[fig:sarkomera]

Obrázek 2.1. Schéma sarkomery [3]

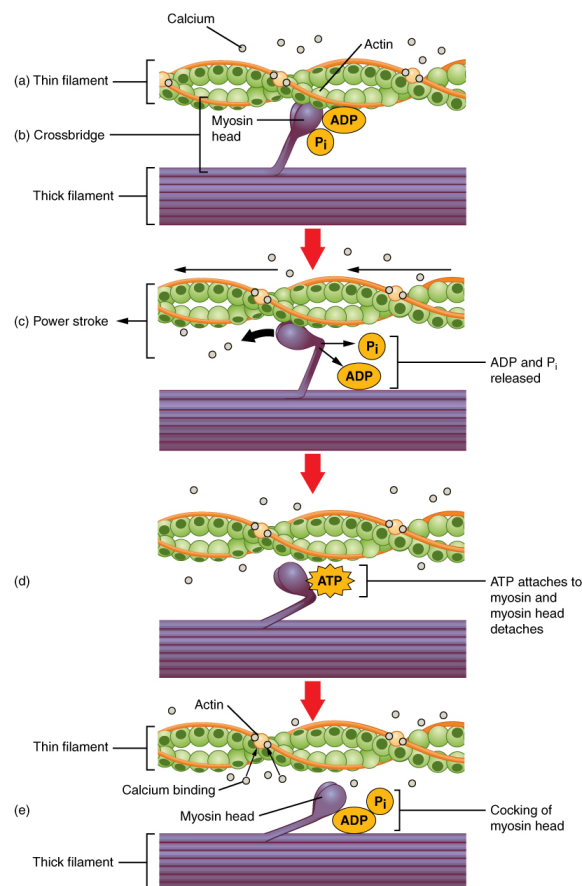
### 2.1.2 Motorické neurony

Ve svalu by nikdy neprobíhala kontrakce nebýt motorických neuronů. Motorické neurony jsou nervové buňky, které slouží k přenášení impulzů z kortexu mozku a mozkového kmene ke svalu. Dělí se na dva typy, horní a dolní. Horní motorické neurony jsou součástí CNS a vedou signál z kortexu mozku, mozkového kmene a mozečku míchou k jednotlivým dolním motorickým neuronům.

Dolní motorické neurony jsou poté nervové buňky, které mají za úkol přenášet signál od horních nervových neuronů. Existují tři hlavní typy dolních motorických neuronů: somatické motorické neurony, branchiální motorické neurony a viscerální motorické neurony. Somatické motorické neurony se dále dělí na tři podtypy: alfa, beta a gamma. Alfa motorické neurony inervují extrafuzální svalová vlákna a jsou primárními nosiči vzruchu při kontrakci kosterních svalů. Jejich těla leží v mozковém kmeni či v míše. Gamma motorické neurony naopak inervují svalová vřeténka a určují jejich citlivost. [4]

### 2.1.3 Kontrakce a relaxace svalového vlákna

V klidu jsou na myosinových hlavách připevněné molekuly ADP a  $P_i$ . Ty jsou záporně nabitě. Stejně tak jsou záporně nabitá vlákna aktinu, a tím pádem se myosin s aktinem slabě odpuzují. [5]



[fig:kontrakce]

**Obrázek 2.2.** Kontrakce svalového vlákna [6]

Kontrakce začíná přijetím nervového akčního potenciálu, který se z dolních motorických neuronů šíří do T-tubul. Depolarizace T-tubul způsobí otevření  $Ca^{++}$  kanálků

v sarkoplazmatickém retikulu. Ty vypouštějí ionty  $\text{Ca}^{++}$ , které se navazují na tropoin na tenkých filamentech, což posune tropomyosinem a odhalují se místa k vázání myosinu. Nyní začíná tzv. cross-bridge cyklus. Vypustí se ADP s  $\text{P}_i$  a myosinová hlava se přichytává k aktinu a následně se posouvá směrem k M-linii. To způsobuje pohyb aktinu a posun o cca 10 nm. Následně se na hlavu přichytává molekula ATP, která se štěpí na ADP a  $\text{P}_i$ . Energie z reakce narovnává myosinovou hlavu do původní polohy a cyklus může začít znovu. [2, 5–6]

Při relaxaci pak dochází ke snížení koncentrace  $\text{Ca}^{++}$  za pomoci ATP-poháněných pump, které ionty odčerpávají zpět do sarkoplazmatického retikula, což způsobí opětovné navázání tropomyosinu na aktin a myosinová hlava se nemůže přichytit. Následně stejná polarita aktinu s ADP způsobuje odsunutí filamentů do počáteční polohy. [2, 5–6]

## 2.2 Hardwarové zpracování signálu EMG

Přístroje pro měření EMG měří změny potenciálu v jednotlivých svaích. Specificita měření se může velmi lišit, od měření jednotlivých vláken, přes svaly, až po celé svalové skupiny. To záleží primárně na použité elektrodě a na filtrovaných frekvencích. Samotný přístroj je v podstatě voltmetr, který měří napětí velká řádově milivoly a následně je zesiluje na vhodné velikosti a potlačuje šum. Cesta signálu je poté z elektrod přes diferenciální zesilovač a filtry do AD převodníku.

### 2.2.1 Elektrody

Elektrody jsou způsob jak interagují elektrodiagnostické metody s lidským tělem. Dají se dělit na dva hlavní typy: povrchové a invazivní.

Povrchové elektrody začínaly jako měděné plošky či kroužky, dnes jsou tyto znovupoužitelné elektrody nahrazovány jednorázovými za účelem snížení rizika infekce. Existuje několik typů povrchových elektrod: elektrody s přímým kontaktem, plovoucí elektrody, hydrogelové elektrody a páskové elektrody.

Elektrody s přímým kontaktem bývaly dříve často měděné a připevněny za pomoci leukoplastů. Jejich velkou výhodou je citlivost u slabých signálů sEMG, tedy například měření klidových svalových činností, naopak se nehodí pro měření dynamických pohybů z důvodu omezení pohybu a jejich odlepování.

Plovoucí elektrody jsou téměř přesným opakem elektrod s přímým kontaktem. Samotná elektroda je zavěšena v malém kalíšku přibližně 1 mm nad pokožkou. Jejich nevýhodou je náročnost přípravy měření a nižší citlivost. Avšak výhodou je nízké omezení pohybu a tak jsou vhodné na dynamické měření.

Dnešním standardem jsou elektrody hydrogelové. Tyto elektrody jsou vyráběné z chloridu stříbrného a jsou přidělány slabou vrstvou vodivého hydrogelu. Díky němu mají nižší impedanci, což způsobuje vyšší šum. Jsou podobné elektrodám s přímým kontaktem, a tak jsou i vhodné na podobné měření, ale drží často lépe, je tedy možné je použít i na málo dynamické pohyby. Zároveň hydrogel je analergický, tedy vhodný pro pacienty s citlivou pokožkou.

Invazivní elektrody jsou hlavně dvou typů: bipolární a monopolární elektrody. Bipolární elektroda jsou prakticky dvě elektrody v jednom. Ve středu je drátková elektroda typicky z platiny s povrchem standardně velikosti mezi 0.01 a 0.09 mm<sup>2</sup>, typicky 0.07 mm<sup>2</sup>. Následně je obalená izolační vrstvou, a poté nerezovým povrchem který slouží jako druhá elektroda. Monopolární je naopak pouze nerezová jehla s potahem z teflonu s odhaleným 1–5 mm hrotu, který slouží jako elektroda o ploše cca 0.03 – 0.34 mm<sup>2</sup>. [5, 7]

### 2.2.2 zesilovač

V přístrojích pro měření EMG se využívá diferenciální zesilovač. To znamená, že nezvyšuje napětí na vstupech, ale rozdíl těchto napětí. Toto zesílení se nazývá gain. V ideálním zesilovači je zesílení pouze rozdíl. To však v reálném zesilovači nelze, společnou složku pouze potlačuje. Kvalitu tohoto potlačení určuje parametr CMRR daný vztahem (1).

$$\text{CMRR}_{\text{dB}} = 20 \times \log_{10} \left( \frac{\text{differential-mode gain}}{\text{common-mode gain}} \right) \quad [\text{eq:cmrr}] \quad (1)$$

CMRR je často kolem 120-150 dB při 50 Hz a s vyššími frekvencemi pak klesá.

Vstupy zesilovače jsou 3, 2 aktivní a jeden pasivní. Dnes jsou značeny E1 (černý vstup), E2 (červený vstup) a E0 (zelený vstup). Dříve se vyskytovalo značení G1, G2 a ground, či **active**, **reference** a **ground**. [5, 7]

### 2.2.3 Filtry

V zesíleném signálu se stále i po potlačení společné složky vyskytují šумы a artefakty. Artefakty jsou dvou typů, technologické a biologické. Mezi technologické se řadí **cable motion artefakt** (frekvence 1-10 Hz), šum z nedokonalého spojení elektrody s pokožkou danou převážně roztahováním pokožky či z biomedicínských zařízení (jako je např. kardiostimulátor). Mezi biologické se řadí převážně šum z okolních svalů (tzv. **crosstalk**). Tyto šумы je následně třeba odfiltrovat, či alespoň minimalizovat. Za tímto účelem se používá několik typů filtrů.

Pásmová zadrž se používá k odstranění artefaktů vzniklých interferencí 50 Hz z napájení. Tato zadrž je velmi úzká nato, aby odstranila pouze 50 Hz a jeho násobky, typicky široká jednotky Hz.

Horní propust odstraňuje nižší frekvence. To odstraňuje pomalu se měnící signály, zkreslení průběhu signálu a hlavně snižuje zpoždění k vrcholům průběhu. Naopak může sama způsobit vznik artefaktů z filtrování.

Dolní propust naopak filtruje vysoké frekvence za účelem snížení amplitudy, šumu a snižuje náběžný čas.

Obě tyto propusti se poté běžně spojují do pásmové propusti. Nejčastěji používané hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 2.1. [5, 7]

### 2.2.4 AD převodník

Pro digitální zpracování je třeba analogový signál diskretizovat. Toho dosahujeme pomocí AD převodníku, který přiřazuje analogovému signálu v daných časech diskrétní hodnotu. Pro zachování kvality signálu je třeba mít dostatečné rozlišení a vysokou vzorkovací frekvenci. Na druhou stranu zbytečně vysoké rozlišení a frekvence způsobí zbytečně velké využití paměti.

Nyquistův teorém říká, že vzorkovací frekvence by měla být alespoň dvakrát tak velká, jak nejvyšší sledovaná frekvence. V praxi je nejčastěji dvakrát až pětikrát vyšší, než nejvyšší sledovaná frekvence. Typicky používané frekvence v EMG jsou v tabulce 2.1.

Rozlišení je třeba stanovit takové, aby se neztratily sledované změny v signálu. Obecně uznávané minimum je 8 bitů, tedy 256 hodnot, jelikož jeden bit vyjadřuje znaménko. Dnes se často používají 24 bitové AD převodníky, které umí vyjádřit 16 777 216 hodnot. [7]

Metoda měření	Amplituda	Frekvence BP	Vzorkovací frekvence
Jehlové EMG	0 – 30 mV	2 Hz – 10 kHz	50 kHz
sfEMG	0 – 50 mV	500 Hz – 10 kHz	50 kHz
sEMG	0 – 10 mV	1 Hz – 1 kHz	5 kHz

[tab:filtfreq]

**Tabulka 2.1.** Typické hodnoty amplitudy, frekvencí BP a vzorkovací frekvence [7]

## 2.3 Umístění elektrod

Existuje mnoho možných poloh elektrod. Obecně je třeba vybrat vhodné místo pro E0, E1 a E2 a umístit je tak, aby mezi nimi byla měřená oblast, tedy typicky podél svalu, či svalové skupiny, popřípadě na opačné končetiny. Jelikož se v rámci práce zabývám pouze měřením u předloktí, uvedu zde možné umístění elektrod pro měření svalů předloktí.

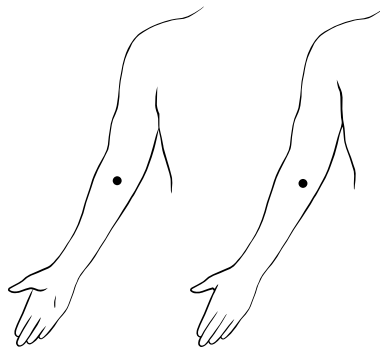
### 2.3.1 Měření flexoru a extenzoru předloktí

Toto umístění slouží k sledování celkového pnutí v předloktí. Využívá se toho k analýze zranění horní končetiny, např. z repetitivních činností.

První elektrodu umísťujeme nad extenzor zápěstí, tedy na dorzální stranu předloktí přibližně 5 cm od lokte. Vhodné místo nalezneme pohmatem, konkrétně položíme prsty na přibližnou lokaci a při extenzi zápěstí se jedná o střed zvýrazněné svalové skupiny.

Druhá elektroda se umísťuje nad flexor zápěstí, tedy ventrální stranu předloktí přibližně 5 cm od lokte. Místo nalezneme podobně jako u první elektrody, pouze zápěstí tentokrát přivedeme do flexe.

Samotné měření je náchylné na činnost ostatních svalových skupin horní končetiny a pronaci/supinaci zápěstí. Měřené hodnoty mohou být také ovlivněny polohou horní končetiny, kdy hodnota při složení rukou v sedě bude jiná, než při rukách volně visících podél těla při stání. [5]



[fig:flex-extenzor]

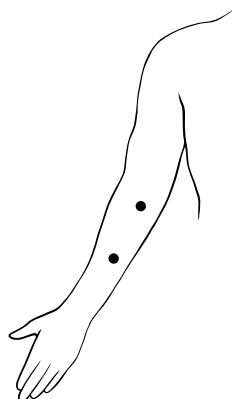
**Obrázek 2.3.** Schéma umístění elektrod pro měření flexoru a extenzoru předloktí. Obrázek převzat od Kateřiny Doubkové; Data převzata z [5]

[sec:electrodes-extenzor]

### 2.3.2 Měření extenzorů zápěstí

Při tomto umístění měříme extenzory zápěstí, primárně extensor digitorum, dále pak extensor carpi radialis a extensor carpi ulnaris. Slouží k posouzení činnosti extenzorů zápěstí za účelem předcházení a léčby zranění způsobených repetitivními činnostmi.

Elektrody se umísťují nad extenzor zápěstí, tedy na dorzální stranu předloktí, přibližně 5 cm od lokte. Přesné umístění zjistíme pohmatem při extenzi zápěstí, kdy elektrody se umísťují do středu zvýrazněné svalové skupiny, 3-4 cm od sebe ve směru svalových vláken.



[fig:extenzor]

**Obrázek 2.4.** Schéma umístění elektrod pro měření extenzorů předloktí. Obrázek převzat od Kateřiny Doubkové; Data převzata z [5]

Je třeba brát na vědomí, že hodnoty mohou být ovlivněny polohou paže, zápěstí a prstů, a úrovní pronace/supinace zápěstí. [5]

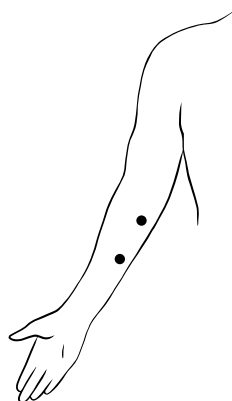
[sec:electrodes-flexor]

### ■ 2.3.3 Měření flexoru zápěstí

Tímto umístěním měříme flexory zápěstí pro sledování činnosti flexorů zápěstí při prevenci a léčbě zranění zápěstí.

Elektrody umístíme na flexory zápěstí, tedy ventrální stranu předloktí, přibližně 5 cm od lokte. Přesnou lokaci nalezneme pohmatem při flexi zápěstí, kdy elektrody dáváme do středu zvýrazněné svalové skupiny přibližně 3-4 cm od sebe ve směru svalových vláken.

Hodnoty mohou být ovlivněny polohou a podepřením ruky, prstů a paže, a úrovní pronace/supinace zápěstí. [5]



[fig:flexor]

**Obrázek 2.5.** Schéma umístění elektrod pro měření flexorů předloktí. Obrázek převzat od Kateřiny Doubkové; Data převzata z [5]

# Kapitola 3

## Legislativa v oblasti pracovní ergonomie

### 3.1 Česká republika

Hygienické limity u fyzické zátěže stanoví v České republice nařízení vlády č. 361/2007 Sb., konkrétně hlava IV.

Její první díl se zabývá celkovou fyzickou zátěží, neboli zátěží při dynamické fyzické práci vykonávané velkými svalovými skupinami, při které je zatěžováno více než 50 % svalové hmoty. Limity jsou stanoveny za užití energetického výdeje, viz tabulky 3.1 a 3.2, a srdeční frekvence, která nesmí průměrně přesáhnout 102 tepů za minutu a jednorázově 110 tepů za minutu. Obě tyto hodnoty platí pouze není-li okamžitá hodnota vyšší než 28 tepů za minutu oproti klidové. [8]

Energetický výdej	15 - 16 let	16 - 17 let	17 - 18 let	18 a více let
Směnový průměrný [MJ]	5.9	6.9	7.9	6.8
Směnový přípustný [MJ]	6.2	7.3	8.5	8
Roční průměrný [MJ]	1390	1620	1860	1600
Minutový přípustný [W]	440	500	540	575

[tab:energy-man]

**Tabulka 3.1.** Přípustné a průměrné hygienické limity energetického výdeje při práci s celkovou fyzickou zátěží u mužů [8]

Energetický výdej	15 - 16 let	16 - 17 let	17 - 18 let	18 a více let
Směnový průměrný [MJ]	3.7	3.8	4.8	4.5
Směnový přípustný [MJ]	4.4	4.6	5.0	5.4
Roční průměrný [MJ]	870	890	1130	1060
Minutový přípustný [W]	350	370	375	395

[tab:energy-woman]

**Tabulka 3.2.** Přípustné a průměrné hygienické limity energetického výdeje při práci s celkovou fyzickou zátěží u žen [8]

Druhý díl se pak zabývá zatížením lokálním. Limity při lokálním zatížení, tedy zatížení malých svalových skupin při práci končetinami, jsou posuzovány na základě počtu pohybů vztahených k průměrné časově vážené hodnotě vynakládaných svalových sil vyjádřené v procentech maximální svalové síly ( $F_{max}$ ). Tento vztah je vyjádřen v tabulce 3.3. [8]

### 3.2 Slovenská republika

Ve Slovenské republice je povinnost dodržovat hygienické limity udává zákon č. 355/2007 Z. z. o ochrane, podpore a rozvoji verejného zdravia, přesněji §30 a §38.



% Fmax	Průměrný počet pohybů	Průměrný minutový počet pohybů
7	27600	58
8	24300	51
9	21800	44
10	19800	41
11	18100	37
12	16700	34
⋮	⋮	⋮
48	3200	7
49	3000	7
50	2700	7
51	2400	7
52	2100	7
53	1800	7

[tab:movement]

**Tabulka 3.3.** Průměrné hygienické limity pro směnové a minutové počty pohybů ruky a předloktí za průměrnou osmihodinovou směnu [8]

Podle nich je zaměstnavatel povinen zajistit posouzení fyzické zátěže při práci, dodržovat nejvyšší přípustné hodnoty vynakládaných svalových sil a frekvence pohybů a dodržovat nejvyšší přípustné hodnoty celkové a lokální zátěže zaměstnanců. Hodnocení se provádí zejména u prací malých svalových skupin horních končetin s vysokými počty pohybů, kde se porovnává podobně jako v ČR počet pohybů vztažených k průměrné časově vážené hodnotě vynakládaných svalových sil vyjádřené v procentech maximální svalové síly. [9–10]

## Kapitola 4

### Aktuální metodika měření

V současnosti probíhá měření při každé změně pracovních procesů certifikovanou laboratorii. Za účelem sjednocení postupů při měření všemi laboratoři, vydalo Ministerstvo zdravotnictví České republiky ve svém Věstníku 6/2022 Metodický návod k zajištění jednotného postupu při autorizované měření, posuzování a interpretaci výsledků měření lokální svalové zátěže metodou integrované elektromyografie.

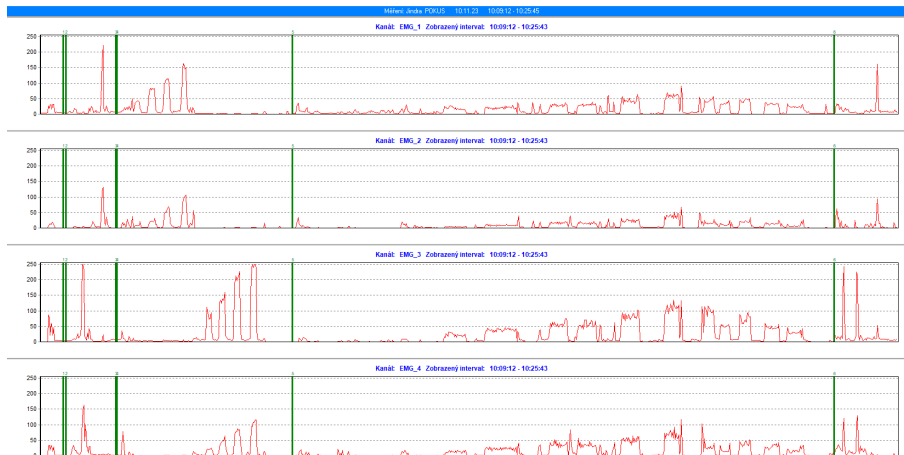
Podle daného Metodického návodu se měří každá činnost pro celou průměrnou směnu. Pokud probíhá řízená rotace pracovníků, kdy interval je maximálně jednodenní, pak se pro výpočet užívá časově vážený průměr všech pozic. Měření se provádí minimálně u dvou osob stejného pohlaví, kdy se preferují praváci, kteří byli již dostatečně zapracováni. [11]

#### 4.1 Standardní postup pro provádění měření

Nejdříve se odmastí povrch pokožky abrazivní pastou, následně se elektrody umístí na předloktí pro měření svalových skupin flexorů a extenzorů, jak jsme popsali v sekcích 2.3.2 a 2.3.3. Přístroj i elektrody lze případně připevnit pomocí náplasti či prubanu.

Po připevnění elektrod se určí velikost  $F_{max}$  pomocí dynamometru. Měření probíhá v definovaných polohách a to stoj, neutrální poloha v rameni, flexe v lokti  $90^\circ$  a neutrální poloha zápěstí, poté stoj, neutrální poloha v rameni, flexe v lokti  $90^\circ$  a stisk podhmatem, a závěrem stoj a neutrální poloha v ramenu, v lokti i zápěstí. Při určení je palec v opozici, stisk probíhá všemi prsty se zapojením palce. Měření probíhá s minutovým intervalem v každé poloze dvakrát s délkou stisku 2 sekundy. V okamžiku stisku dynamometru nastavíme zesílení přístroje tak, aby hodnota  $F_{max}$  byla v  $1/3$  až  $2/3$  rozsahu, kdy zesílení při hodnotě  $F_{max}$  musí být stejné jako v průběhu měření.

Po nastavení zesílení a určení hodnoty  $F_{max}$  probíhá samotné měření. V jeho průběhu dochází k popisu pracovních činností, zejména časové charakteristiky, odpočinkové časy a určení podílu statické a dynamické složky práce, a záznam počtu pohybů rukou a předloktí. To lze provádět buď na místě, či pomocí videozáznamu. videozáznam lze následně synchronizovat se záznamem EMG, což dává možnost vytipovat rizikové úkony. Počítání pohybů na místě se provádí opakovaně a v náhodných intervalech, kdy na konci se provede aritmetický průměr. Následně se vynásobením průměru hodnot danou výkonnostní normou vypočítá celosměnový počet pohybů. Při počítání se upřednostňuje zjištění počtu pohybů vztahených na 1 úkon, operaci, cyklus nebo kus. V případě že to není možné, lze vycházet z počtu pohybů vztahených na 1 časovou jednotku. Délka měření vždy vychází z požadavku, aby byly vyhodnoceny všechny činnosti prováděné v průměrné pracovní směně. Doporučená délka měření činnosti, kde perioda cyklu nepřekračuje 2 minuty, je minimálně 20 minut. Pokud je perioda delší než 2 minuty, či se střídá větší množství činností, pak se doporučuje měření alespoň 40 minut. [11]



[fig:geta-mereni]

**Obrázek 4.1.** Ukázka křivky v programu EMG Analyzer za užití přístroje EMG Holter

## 4.2 Vyhodnocení měření

Naměřené hodnoty procent Fmax se časově převáží dle zaznamenaných časových charakteristik na průměrnou směnu. Do časového vážení se nezapočítává zákonná přestávka na jídlo a odpočinek. Bezpečnostní a technologické přestávky se do průměrné směny započítávají také a to hodnotou 5 % Fmax, vykonával-li pracovník o přestávce nenáročné drobné operace, a 3 % nevykonával-li žádnou činnost. Činnosti jako úklid a příprava pracoviště se měřit nemusí, avšak ani v takovém případě je nelze vynechat z časového vážení a požívá se hodnota 5 až 8 % Fmax. Výběr hodnoty provádí odhadem odborný pracovník autorizované fyziologické laboratoře v závislosti na náročnosti dané činnosti.

Frekvenční analýza Měření Jindra/ POKUS

Měření Jindra/ POKUS OPERACE Jindra - Souhrnná délka: 00:13:23 Počet vzorků: 803

	EMG_1			EMG_2			EMG_3			EMG_4		
	%	Počet	Počet./čas	%	Počet	Počet./čas	%	Počet	Počet./čas	%	Počet	Počet./čas
0 - 5	60,52	486	17431	64,88	521	18686	64,51	518	18578	61,64	495	17753
5 - 10	13,08	105	3766	13,45	108	3873	5,73	46	1650	8,59	69	2475
10 - 15	11,83	95	3407	10,34	83	2977	5,11	41	1470	7,72	62	2224
15 - 20	6,23	50	1793	4,98	40	1435	7,22	58	2080	6,85	55	1973
20 - 25	3,11	25	897	1,74	14	502	4,86	39	1399	5,11	41	1470
25 - 30	2,37	19	681	1,37	11	395	2,49	20	717	2,99	24	861
30 - 35	0,75	6	215	1,12	9	323	2,24	18	646	2,49	20	717
35 - 40	0,62	5	179	0,62	5	179	1,87	15	538	1,25	10	359
40 - 45	0,25	2	72	0,25	2	72	2,12	17	610	0,87	7	251
45 - 50	0,25	2	72	0,37	3	108	1,12	9	323	1,00	8	287
50 - 55	0,37	3	108	0,25	2	72	0,75	6	215	0,37	3	108
55 - 60	0,00	0	0	0,00	0	0	0,12	1	36	0,37	3	108
60 - 65	0,00	0	0	0,12	1	36	0,25	2	72	0,12	1	36
65 - 70	0,37	3	108	0,12	1	36	0,00	0	0	0,25	2	72
70 - 75	0,25	2	72	0,12	1	36	0,00	0	0	0,37	3	108
75 - 80	0,00	0	0	0,12	1	36	0,37	3	108	0,00	0	0
80 - 85	0,00	0	0	0,12	1	36	0,25	2	72	0,00	0	0
85 - 90	0,00	0	0	0,00	0	0	0,12	1	36	0,00	0	0
90 - 95	0,00	0	0	0,00	0	0	0,12	1	36	0,00	0	0
> 95	0,00	0	0	0,00	0	0	0,75	6	215	0,00	0	0
Čas (min)	13,4	13,4	480	13,4	13,4	480	13,4	13,4	480	13,4	13,4	480

Volby tabulky: 480 Čas přepočtu [min]

Způsob zobrazení údajů: ☐ Kumulativní součty ☒ Absolutní hodnoty

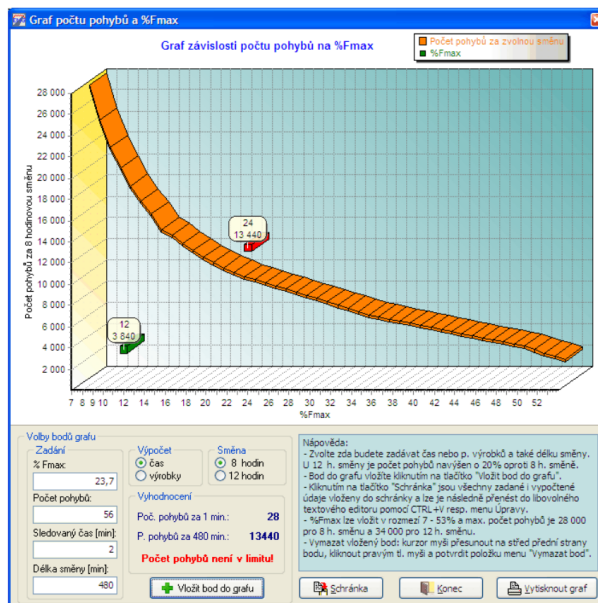
Zobrazit sloupce: ☒ Procenta ☒ Počet ☒ Počet za čas přepočtu ☒ Hodnoty času v palčice

[fig:geta-frek]

**Obrázek 4.2.** Ukázka frekvenční analýzy v programu EMG Analyzer za užití přístroje EMG Holter

Převážené průměrné výsledky jsou následně porovnány s hygienickými limity. Svalové síly nad 70 % Fmax jsou považovány za nadlimitní zátěž u prací s převahou dynamické složky, u práce s převahou statické složky je nadlimitní zátěž nad 45 % Fmax.

V případě, že na dané pozici pracují jak muži, tak ženy, nelze výsledek měření přepočítávat. Avšak pokud měření uskutečněné u žen nepřekračuje hygienické limity, pak lze výsledek interpretovat tak, že nepřekračuje hygienické limity ani u mužů. Naopak pokud hodnoty naměřené u mužů překračují nějaké hygienické limity, pak lze kategorizovat práci u žen shodně jako u mužů. V případech, kdy měření u žen překročilo hygienické limity, či měření u mužů limity nepřekročilo, je třeba provést měření samostatně pro obě pohlaví.



[fig:geta-res]

**Obrázek 4.3.** Ukázka výsledků měření v programu EMG Analyzer za užití přístroje EMG Holter [12]

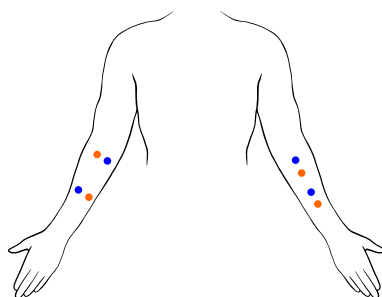
Při hodnocení lokální svalové zátěže ve směnách delších než 480 minut se provádí navýšení limitů vynakládaných sil v rozmezí 55-70 % Fmax a průměrné směnové počty pohybů ruky a předloktí a to vždy o 2.5 % za každých započatých 30 minut práce nad 480 minut. [11]

# Kapitola 5

## Návrh a provedení experimentu

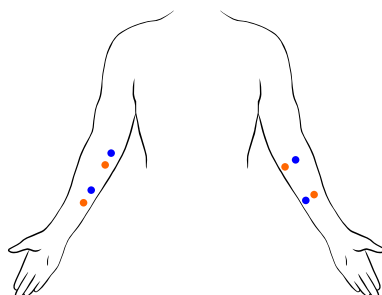
### 5.1 Příprava experimentu

Jelikož porovnáváme výsledky z měření dvou přístrojů, GETA Holter a Shimmer, je třeba změřit co nejsrovnatelněji oba při stejných činnostech. Jelikož sval se experimentem unaví nelze provést měření nejdříve s jedním přístrojem a následně s druhým. Další možností bylo provést měření po částech vždy jedním a následně druhým přístrojem. To není ideální z důvodu nutnosti přepojovat elektrody mezi přístroji, což způsobuje dekalibraci přístroje GETA Holter a zároveň uvolnění elektrod na pokožce, tedy experiment také není validní. Jako nejlepší možnost bylo zvoleno měření zároveň, kdy jsme využili umístění elektrod dle 2.3.2 a 2.3.3. Toto umístění bylo mírně poupraveno pro naše potřeby. Na pravé ruce byly elektrody umístěny střídavě, na levé křížem. Toto rozložení bylo zvoleno z důvodu dosažení co nejvyšší přesnosti, kdy ideální zapojení nelze dosáhnout u obou, tak byla zvolena tato dvě pro porovnání. U obou přístrojů byla zemní elektroda přilepena na loket. Po přidělení elektrod a přístrojů GETA Holter a Shimmer byla provedena kalibrace přístroje GETA Holter dle manuálu.



[fig:experiment\_ext]

**Obrázek 5.1.** Schéma umístění elektrod při experimentu na dorzální straně (oranžově Shimmer, modře GETA Holter). Obrázek převzat od Kateřiny Doubkové



[fig:experiment\_flex]

**Obrázek 5.2.** Schéma umístění elektrod při experimentu na ventrální straně (oranžově Shimmer, modře GETA Holter). Obrázek převzat od Kateřiny Doubkové

## 5.2 Experiment

Aktivity v experimentu byly zvoleny tak, aby byly opakovatelné a jasně měřitelné, ale zároveň co nejvíce se připomínaly činnosti v praxi při měření na pracovištích. Po každé aktivitě vždy proběhlo 10 sekund odpočinku. Na začátku a na konci experimentu byla změřená referenční  $F_{max}$  pomocí dynamometru. Harmonogram experimentu je v tabulce 5.1. Měřená osoba při experimentu seděla u stolu na doraz tak, aby byla schopna položit lokty téměř do pravého úhlu. Aktivity typu přenášení bylo přenášení předmětů o různých vahách mezi dvěma body vzdálenými 30cm s položením na začátku a konci pohybu předmětu na stůl do rytmu metronomu nastaveného na 55 bpm. Měřilo se na obou předloktích zároveň.

délka (s)	činnost	váha (kg)
	Měření $F_{max}$ na dynamometru	
5	Držení dynamometru na konstantní síle	10
5	Držení dynamometru na konstantní síle	20
5	Držení dynamometru na konstantní síle	30
10	Přenášení 4 puků slepených k sobě	0.65
10	Přenášení hřídele na činku	2.2
10	Přenášení hřídele na činku a kotouč 1.5 kg	3.7
10	Přenášení hřídele na činku a kotouč 2.5 kg	4.7
10	Přenášení hřídele na činku a 2 kotouče 1.5 kg	5.2
	Rotace zápěstí se závažím (pouze druhý průběh)	2.2
	Měření $F_{max}$ na dynamometru	

[tab:experiment]

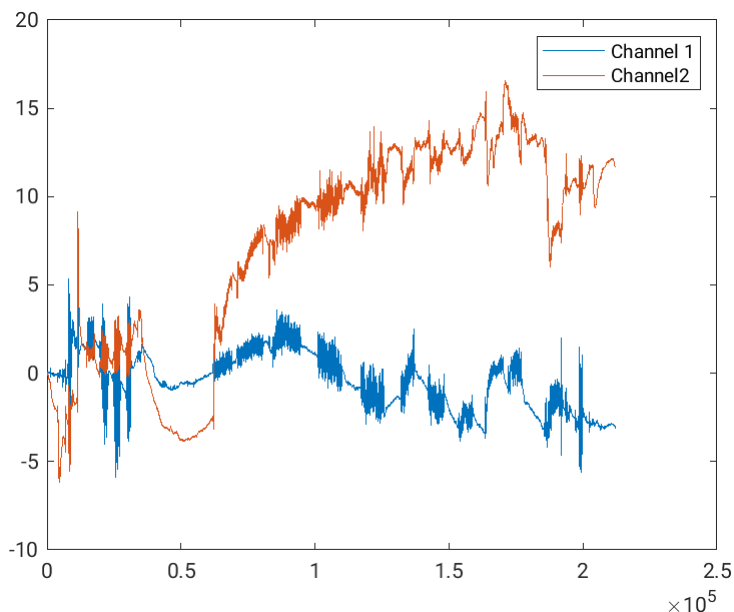
**Tabulka 5.1.** Harmonogram aktivit v experimentu

# Kapitola 6

## Zpracování signálů

### 6.1 Zpracování signálu z přístroje Shimmer

Shimmer ukládá data do souborů csv. Je tedy třeba je načíst a vybrat korektní sloupce (18 a 20) vytvořit z nich vektory.



[fig:signal\_raw]

**Obrázek 6.1.** Surová data z přístroje Shimmer

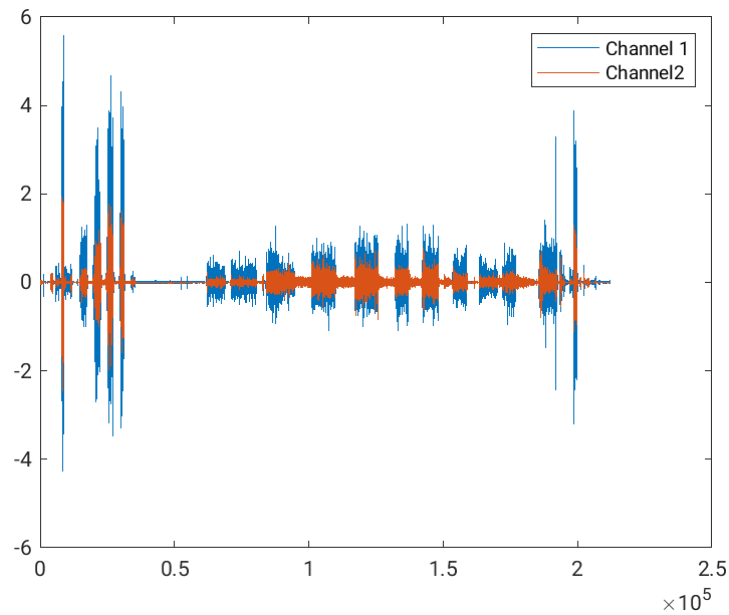
Následně filtrujeme šумы a artefakty ze signálu. Volíme BP na frekvencích 20 - 120 Hz. Pásmová zadrž není třeba použít díky napájení přístroje z baterií. Využíváme butterworthův filter 6. řádu.

Následně spočítáme obálku signálu. Ta se rovná absolutní hodnotě signálu.

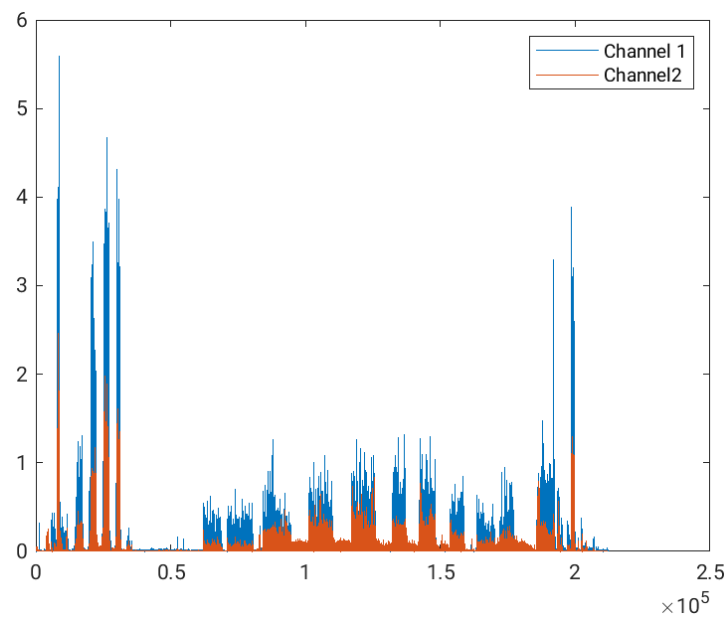
Tato obálka lze použít, pro porovnání se GETA je třeba převzorkovat signál ze vzorkovací frekvence 256 Hz na 1 Hz. To provedeme spočítáním RMS dle vzorce (1) pro každých 256 vzorků (tedy jednu sekundu signálu).

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{256} \sum_{i=1}^{256} x_i^2} \quad [eq:rms] \quad (1)$$

Nyní můžeme porovnat náš zpracovaný signál z přístroje Shimmer s výsledkem z blackboxu systému GETA. Vidíme, že po normalizaci průměrnou hodnotou, jsou si signály podobné. Odchyly lze očekávat vzhledem k neideálním podmínkám měření.



[fig:signal\_bp]

**Obrázek 6.2.** Signál filtrovaný pásmovou propustí

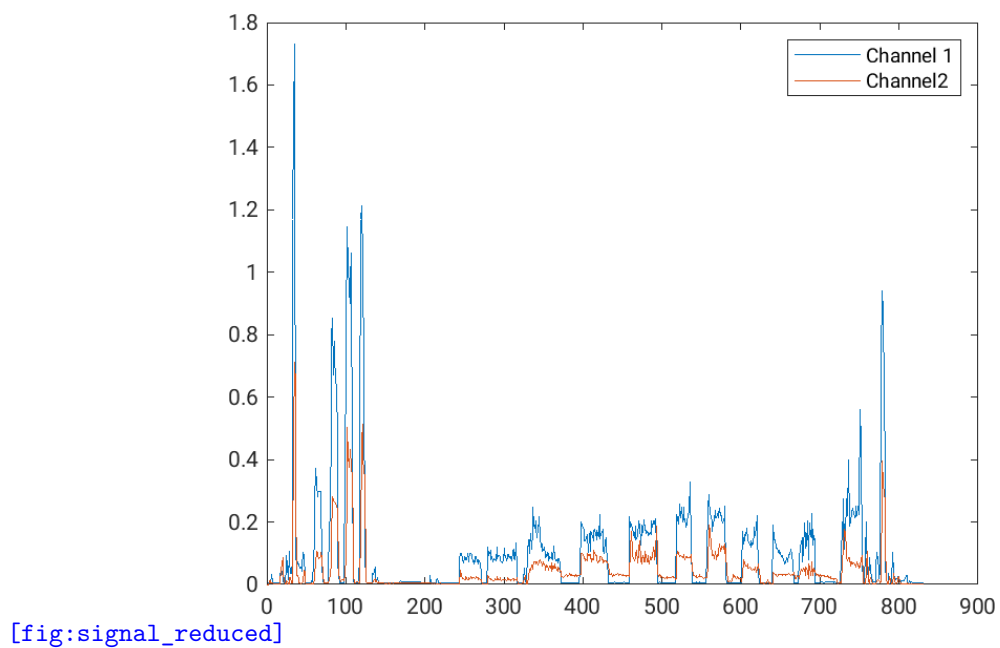
[fig:signal\_envelope]

**Obrázek 6.3.** Obálka filtrovaného signálu

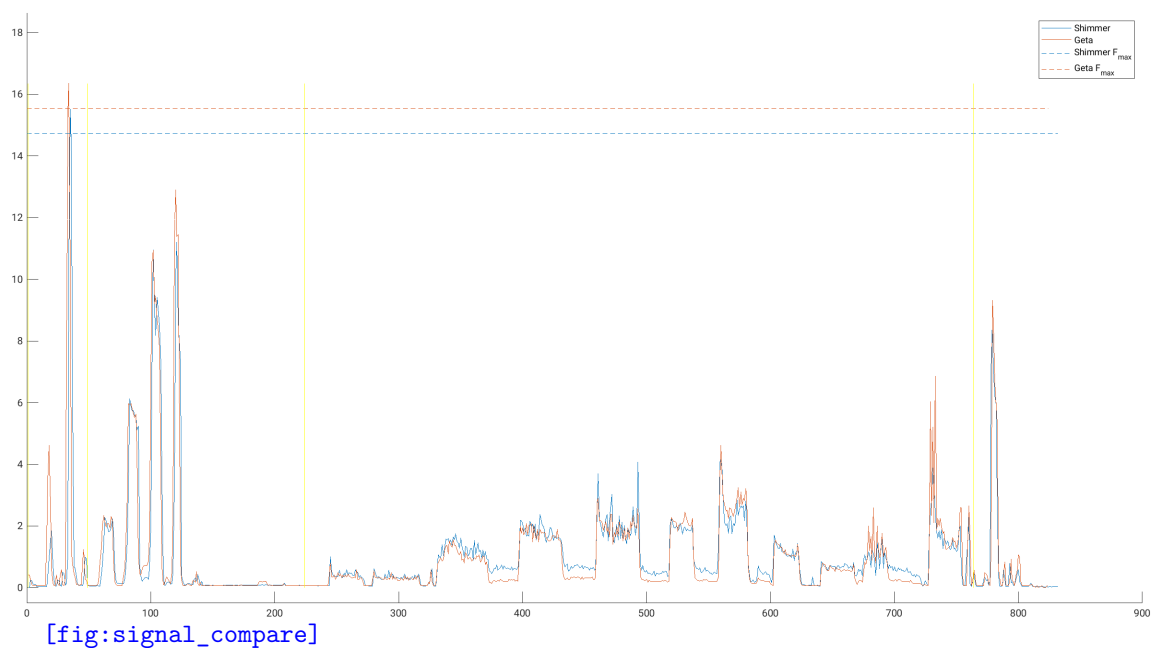
## 6.2 Vytvoření histogramů

Histogramy hledáme pro násobky 5 % maximální síly. Nejdříve spočítáme prahy jednotlivých binů a následně přiřadíme hodnoty počtu vyskytujících se vzorků mezi prahy do binů. Hodnoty větší než je maximální síla zahrnujeme do binu větší než 95 %. Následně pak normalizujeme velikosti histogramu tak, aby sčítal do 100.

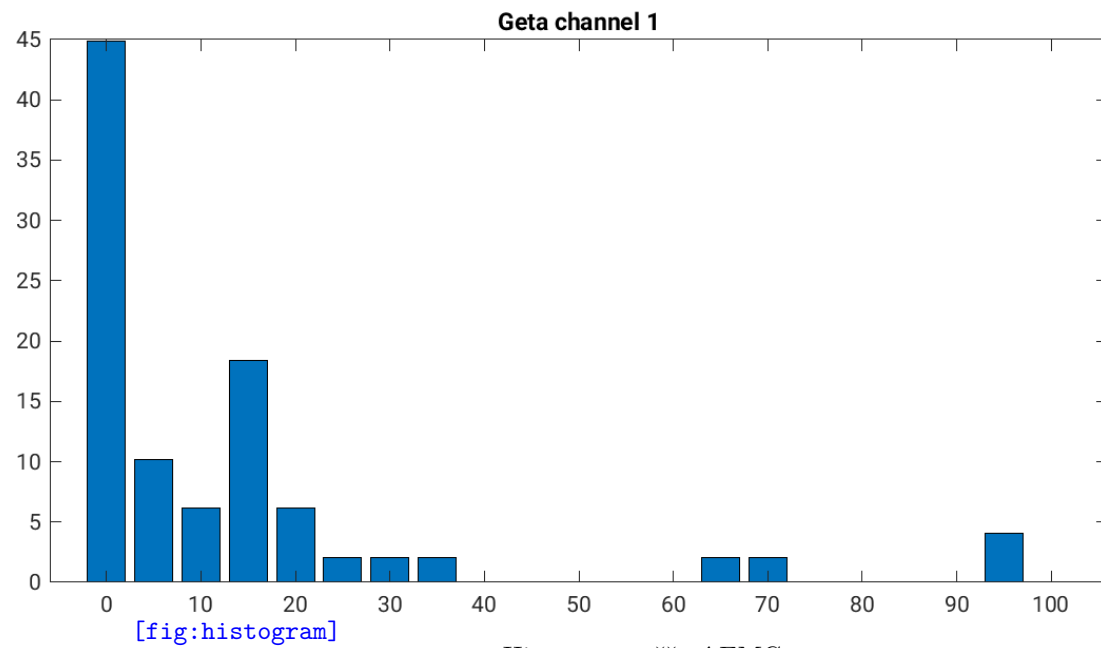




Obrázek 6.4. Převzorkovaná obálka filtrovaného signálu



Obrázek 6.5. Srovnání signálů mezi přístroji



**Obrázek 6.6.** Histogram měření EMG



# **Kapitola 7**

## **Závěr**

## Literatura

- [1] FENCLOVÁ, Zdenka, Dana HAVLOVÁ, Michaela VOŘÍŠKOVÁ, Pavel URBAN a Jan ŽOFKA. *Nemoci z povolání v České republice v roce 2022*. Dostupné na <https://szu.cz/wp-content/uploads/2023/04/V-roce-2022.pdf>.
- [2] COSTANZO, Linda S. *Physiology*. 6. vyd. Philadelphia, PA: Elsevier, 2018. ISBN 978-0-323-47881-6.
- [3] LUTHER, Pradeep. The vertebrate muscle Z-disc: Sarcomere anchor for structure and signalling. *Journal of muscle research and cell motility*. 2009, ročník 30, s. 171–185. Dostupné na DOI 10/dcnf9m.
- [4] ZAYIA, Lindsay C. a Prasanna TADI. *Neuroanatomy, Motor Neuron*. Dostupné na <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK554616/>.
- [5] CRISWELL, Eleanor a Jeffrey R. CRAM. *Cram's introduction to surface electromyography*. 2. vyd. Sudbury, MA: Jones and Bartlett, 2011. ISBN 978-0-7637-3274-5.
- [6] MENEFEE, Whitney, Julie JENK, Chiara MAZZASETTE a Kim-Leiloni NGUYEN. *Human Anatomy*. Dostupné na [https://med.libretexts.org/Bookshelves/Anatomy\\_and\\_Physiology/Human\\_Anatomy\\_\(OERI\)/](https://med.libretexts.org/Bookshelves/Anatomy_and_Physiology/Human_Anatomy_(OERI)/).
- [7] TANKISI, Hatice, David BURKE, Liying CUI, Mamede DE CARVALHO, Satoshi KUWABARA, Sanjeev D. NANDEDKAR, Seward RUTKOVE, Erik STÅLBERG, Michel J.A.M. VAN PUTTEN a Anders FUGLSANG-FREDERIKSEN. Standards of instrumentation of EMG. *Clinical Neurophysiology*. 2020, ročník 131, č. 1, s. 243–258. ISSN 13882457. Dostupné na DOI 10/gg8732.
- [8] Nařízení vlády č. 361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci ve znění nařízení vlády č. 68/2010 Sb., nařízení vlády č. 93/2012 Sb., nařízení vlády č. 9/2013 Sb., nařízení vlády č. 32/2016 Sb., nařízení vlády č. 246/2018 Sb., nařízení vlády č. 41/2020 Sb., nařízení vlády č. 467/2020 Sb., nařízení vlády č. 195/2021 Sb., nařízení vlády č. 303/2022 Sb., nařízení vlády č. 330/2023 Sb. a nařízení vlády č. 452/2023 Sb. Dostupné na <https://www.e-sbirka.cz/sb/2007/361/2024-01-01>.
- [9] HALÁSOVÁ, Simona a Vladimíra LIPŠOVÁ. *Posuzování lokální svalové zátěže v jednotlivých Státech EU a v ostatních státech světa se zaměřením na syndrom karpálního tunelu*. Dostupné na [https://szu.cz/wp-content/uploads/2023/02/posuzovani\\_LSZ\\_ve\\_statech\\_EU.pdf](https://szu.cz/wp-content/uploads/2023/02/posuzovani_LSZ_ve_statech_EU.pdf).
- [10] Zákon č. 355/2007 Z. z. o ochraně, podpoře a rozvoji veřejného zdraví. Dostupné na <https://www.slov-lex.sk/pravne-predpisy/SK/ZZ/2007/355/20130701.html>.
- [11] MINISTERSTVO ZDRAVOTNICTVÍ ČR. *Věstník 6/2022*. Dostupné na [https://mzd.gov.cz/wp-content/uploads/2022/05/Vestnik-MZ\\_6-2022.pdf](https://mzd.gov.cz/wp-content/uploads/2022/05/Vestnik-MZ_6-2022.pdf).
- [12] GETA CENTRUM S.R.O. *EMG Analyzer Uživatelský Manuál*.

## **Příloha A**

### **Seznam použitých zkratk**

$P_i$	■	Anorganická iontová forma fosfátu
ADP	■	Adenosindifosfát
ATP	■	Adenosintrifosfát
BP	■	Pásmová propust
CMRR	■	Common mode rejection ratio
CNS	■	Centrální nervová soustava
EKG	■	Elektrokardiografie
EMG	■	Elektromyografie
RMS	■	Root Mean Square
sEMG	■	Povrchová EMG
sfEMG	■	EMG jednoho svalového vlákna

## Requests for correction

- [rfc-1] TODO: Doplnit poděkování
- [rfc-2] TODO: Doplnit abstrakt CZ
- [rfc-3] TODO: Doplnit klíčová slova CZ
- [rfc-4] TODO: Doplnit abstrakt EN
- [rfc-5] TODO: Doplnit klíčová slova EN
- [rfc-6] REVIEW: Nechat?
- [rfc-7] REVIEW: vymyslet možná lepší název
- [rfc-8] TODO: Doplnit obrázek
- [rfc-9] TODO: Předělat subsekcí
- [rfc-10] TODO: Upravit tabulku/dovysvětlit proč my 256 Hz
- [rfc-11] TODO: Doplnit současný stav