# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE


# VALIDITA ODHADU METABOLICKÉ AKTIVITY POMOCÍ KOMERČNĚ DOSTUPNÝCH CHYTRÝCH HODINEK

VALIDITY OF COMMERCIALLY AVAILABLE SMARTWATCHES WHEN ESTIMATING ENERGY EXPENDITURE

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS


**AUTOR PRÁCE** Bc. David Kopecký

AUTHOR

**VEDOUCÍ PRÁCE** Ing. Barbora Řehák Kopečková

SUPERVISOR



**BRNO 2023**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

# Zadání diplomové práce

| | |
|---|---|
| Ústav: | Energetický ústav |
| Student: | **Bc. David Kopecký** |
| Studijní program: | Energetické a termofluidní inženýrství |
| Studijní obor: | Technika prostředí |
| Vedoucí práce: | **Ing. Barbora Řehák Kopečková** |
| Akademický rok: | 2022/23 |

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Validita odhadu metabolické aktivity pomocí komerčně dostupných chytrých hodinek

**Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Metabolická produkce tepla (metabolická aktivita, výdej) je závislá na intenzitě fyzické zátěže a liší se dle vykonávané činnosti. Její hodnota je stěžejním vstupem do velkého množství jak termofyziologických modelů predikujících jednotlivé termofyziologické vlastností lidského těla, jako je např. rektální teplota, či střední teplota pokožky, tak také dále vstupuje do výpočtů indexů tepelného stresu, popřípadě do modelů predikujících tepelný pocit člověka. Hodnotu metabolické aktivity lze měřit mnoha způsoby, které se liší jak svou složitostí, tak také finální přesností. Z tohoto hlediska (měření metabolického výdeje) se v poslední době do popředí zájmu dostávají různé zápěstní měřiče, ať se už jedná o jednoduché a levné fitness náramky, či komplexnější a dražší sporttestery/sportovní hodinky.
Tato práce bude zaměřena na téma měření metabolické aktivity pomocí vybraných chytrých hodinek a na porovnání výsledků tohoto měření s výsledky nepřímé kalorimetrie.

**Cíle diplomové práce:**

Vypracování rešerše zaměřené na metody měření a odhadu metabolické aktivity.
Pro vybrané komerčně dostupné chytré hodinky proměřit vybrané aktivity a porovnat výsledky daného měření s výsledky nepřímé kalorimetrie.

**Seznam doporučené literatury:**

SLABOTINSKÝ, Jiří a Kamila LUNEROVÁ. Fyziologická zátěž člověka při práci v osobních ochranných prostředcích v kontaminovaném prostředí. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2017. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). ISBN 978-80-7385-192-7.

DÜKING, Peter, Laura GIESSING, Marie FRENKEL, Karsten KOEHLER, Hans-Christer HOLMBERG a Billy SPERLICH. Wrist-Worn Wearables for Monitoring Heart Rate and Energy Expenditure While Sitting or Performing Light-to-Vigorous Physical Activity: Validation Study. JMIR mHealth and uHealth. 2020, 8(5). ISSN 2291-5222. Dostupné z: doi:10.2196/16716.

GASMIN, Eric et al. Applications and Efficacy of Portable Wearable Metabolic Devices. In: Sañudo Corrales, B., García-Fernández, J. (eds) Innovation in Physical Activity and Sport. Tapasconference 2020, pp 9–25. Lecture Notes in Bioengineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92897-1_2.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

| | |
|---|---|
| doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.<br>ředitel ústavu | doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.<br>děkan fakulty |

## ABSTRAKT

Metabolická aktivita je energetickou veličinou, jejíž hodnota je stěžejním vstupem nejen do termofyziologických modelů, ale také vstupuje do výpočtu indexů tepelného stresu či komplexních modelů predikujících tepelný pocit člověka. S dynamickým rozvojem techniky se objevují sporttestery, které jsou schopny mimo jiné odhadovat energetický výdej. Jedná se o neinvazivní možnost odhadu energetického výdeje potažmo metabolické aktivity, která využívá k její predikci přidružených tělesných funkcí. Tato práce se zabývá validitou přesnosti odhadu metabolické aktivity pomocí sporttesteru Garmin Fenix 6X Pro vůči nepřímé kalorimetrii. Byla zkoušena přesnost odhadu metabolické aktivity u činností ležení, administrativní práce a jízda na kole s regulovaným mechanickým odporem 100 a 150 W. Testování se účastnilo 15 probandů mužského pohlaví ve věku 28 ± 5 let, s hmotností 83,2 ± 13,5 kg a výškou 180 ± 7 cm. Z hlediska výsledků je možné pozorovat nižší přesnost predikce metabolické aktivity pro činnosti o nízké intenzitě, výsledná MAPE se pohybovala okolo 19–43 %. Oproti tomu u činností o střední aktivitě byla prokázána dostatečná přesnost predikce metabolické aktivity pomocí použitého sporttesteru, a to s výslednou MAPE v rozmezí 6–8 %.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Garmin Fenix 6X Pro, Oxycon Mobile, metabolická aktivita, sporttester, nepřímá kalorimetrie

## ABSTRACT

Metabolic rate is an energy quantity. Its value is a key input not only in thermophysiological models, but also in the calculation of heat stress indices or complex models predicting a person's thermal sensation. With the dynamic development of technology, sporttesters are able to estimate energy expenditure, among other things. It is a non-invasive method of estimating energy expenditure, or metabolic rate, using associated body functions to predict it. This work deals with the validity of the accuracy of metabolic rate estimation using the Garmin Fenix 6X Pro sporttester in comparison with indirect calorimetry. The accuracy of the metabolic rate estimation was tested for the activities of lying down, administrative work and cycling with regulated mechanical resistance of 100 and 150 W. 15 male subjects aged 28 ± 5 years, with a weight of 83.2 ± 13.5 kg and a height of 180 ± 7 cm participated in the study. In terms of the results, it is possible to observe a lower accuracy of prediction of metabolic rate for low-intensity activities, with the resulting MAPE being around 19-43 %. On the other hand, for activities with moderate activity, the prediction of the metabolic rate by the used sporttester proved to be sufficiently accurate, with a resulting MAPE in the range of 6–8 %.

## KEY WORDS

Garmin Fenix 6X Pro, Oxycon Mobile, Metabolic rate, Sporttester, Indirect calorimetry

BIBLIOGRAFICKÉ CITACE

KOPECKÝ, David. *Validita odhadu metabolické aktivity pomocí komerčně dostupných chytrých hodinek* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149533. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Barbora Řehák Kopečková.

**PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma ***Validita odhadu metabolické aktivity pomocí komerčně dostupných chytrých hodinek*** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

_____ _____

Datum *David Kopecký*

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Barboře Řehák Kopečkové za cenné připomínky a rady, které mi poskytla při vypracování závěrečné práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Kamilu Řehákovi Ph.D. za zapůjčení technického zařízení pro měření a regulaci mechanického odporu. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat všem probandům, kteří se účastnili testování.

# Obsah

Obsah ..... 9
Úvod ..... 12
1 Termodynamika a přenos tepla ..... 14
1.1 Termodynamická soustava ..... 14
1.2 Termodynamické zákony ..... 16
1.2.1 První zákon termodynamiky ..... 16
1.2.2 Druhý zákon termodynamiky ..... 18
1.3 Mechanismy přenosu tepla ..... 19
1.3.1 Přenos tepla vedením ..... 19
1.3.2 Přenos tepla prouděním ..... 20
1.3.3 Přenos tepla zářením ..... 21
1.3.4 Přenos tepla vypařováním ..... 21
1.3.5 Přenos tepla dýcháním ..... 22
1.4 Tepelná rovnováha lidského těla ..... 23
2 Biologický náhled na problematiku ..... 25
2.1 Metabolismus ..... 25
2.1.1 Bazální metabolismus ..... 26
2.1.2 Klidový energetický výdej ..... 29
2.1.3 Hodnota VO2max ..... 31
2.2. Tělesná teplota a termoregulace ..... 32
2.2.1 Měření tělesné teploty ..... 32
2.2.2 Termoregulace a mechanismy jejího řízení ..... 33
3 Metabolické teplo a metabolická aktivita ..... 34
3.1 Vliv intenzity pohybu na energetický výdej ..... 35
3.2 Vliv oblečení a okolní teploty na MR ..... 36
3.3 Závislost MR na energetickém výdeji a srdeční frekvenci ..... 37
3.4 Aplikace hodnoty MR v technické praxi ..... 38
3.5 Externí práce a MR ..... 39
4 Metody měření metabolické aktivity ..... 40
4.1 Přímá kalorimetrie ..... 40
4.2 Doubly labeled water technique ..... 40
4.3 Nepřímá kalorimetrie ..... 41
5 Zařízení využívající nepřímé kalorimetrie ..... 45

5.1 Omnical ... 45
5.2 Cosmed ... 48
5.2.1 Cosmed K5 ... 48
5.3 Vyaire Medical ... 50
5.3.1 Oxycon Mobile ... 51
5.4 Další studie validující přístroje využívající nepřímou kalorimetrii se zaměřením na návrh měření ... 53
5.5 Shrnutí a naznačení budoucích trendů ... 54
6 Metody odhadu metabolické aktivity ... 56
6.1 Odhad metabolické aktivity ze srdeční frekvence ... 56
6.1.1 Vztah mezi HR a MR ... 61
6.1.2 Validační studie odhadu MR z HR ... 62
6.2 Odhad metabolické aktivity dle tabelovaných hodnot ... 63
6.3 Odhad metabolické aktivity pomocí sporttesterů ... 63
7 Průběh vlastního měření ... 69
7.1 Dobrovolníci a podmínky měření ... 69
7.2 Návrh postupu měření ... 70
7.3 Popis průběhu testu ... 72
8 Výsledky s analýzou a diskuzí ... 74
8.1 Výsledky jednotlivých probandů pro vykonávané činnosti ... 74
8.2 Souhrnné výsledky a jejich diskuze ... 82
8.3 Metabolická aktivita vypočtená na základě HR ... 85
8.4 Testy o vysoké intenzitě ... 89
9 Závěr ... 94
10 Zdroje ... 102

# Úvod

Lidské tělo a jeho funkce fascinovaly člověka již od pradávna. Však na poznání lidského těla je založena celá medicínská věda, která v současnosti cíleně prohlubuje spolupráci s technikou. Důvodem, proč je výhodné aplikovat poznatky z technologického rozvoje do medicínských věd, je primárně zlepšení zdravotní péče pro běžného člověka. Vyspělé zdravotnictví je důležitým pilířem v rozvinuté společnosti, a proto je nutné neustále tuto oblast rozvíjet. Aby se zdravotnictví přizpůsobovalo dnešní moderní dynamické době, je důležité hledat možné využití nových technických zařízení právě v této oblasti.

Dále se zaměříme na energetické hledisko lidského těla, které však lze popsat jak z biologického, tak technického hlediska. V této práci se více zaměřujeme na hledisko technické, pro které je však lidské tělo opravdovou výzvou. Věda, kterou využijeme pro popis lidského těla z technického hlediska, se nazývá termomechanika. I přesto, že lidské tělo je velmi složitým otevřeným termodynamickým systém [1], lze jej popsat pomocí základních fyzikálních zákonů.

Energetické hledisko popisu lidského těla je spojeno převážně s kvalifikací tepelného pocitu/komfortu osob, potažmo s predikcí termofyziologických vlastností v podobě např. vnitřní teploty těla člověka. Je založeno na energetické bilanci lidského těla, která říká, že teplo které v lidském těle vzniká by mělo být odvedeno, aby nedocházelo ke kumulaci nebo teplotní depresi. Člověk udržuje stálou tělesnou teplotu, proto by měl v ideálním případě mít tepelnou bilanci vyrovnanou [1]. Dále se blíže zaměříme na teplo, které v lidském těle vzniká.

V rámci této studie pracujeme primárně s termínem metabolická aktivita, což je specifická energetická veličina, která je skloňována s fyzickou zátěží osob. Je základním vstupním parametrem do predikčních rovnic či modelů, simulací, ale hlavně dává informaci o tom, kolik tepla člověk produkuje. Znalost přesné hodnoty této veličiny je tak nezbytná nejen v technických aplikacích, ale třeba i v oblastech výživy, či sportovní medicíny.

Metabolickou aktivitu je možné měřit pomocí přímé a nepřímé kalorimetrie [1]. Častější pro měření je kalorimetrie nepřímá, ale i pro její uskutečnění je nutné značné technické zázemí. Testovaný subjekt musí být buď napojen na dýchací masku nebo musí být ve speciální komoře, což u něj způsobuje nejen stresovou situaci, ale nelze odhadovat metabolickou aktivitu např. v ochranných oblecích či při libovolných činnostech. Proto se hledají jiné možnosti odhadu metabolické aktivity, které by dávaly srovnatelné výsledky s nepřímou kalorimetrií, avšak nebyly by tak náročné nejen na technické zázemí, ale i na provozní podmínky, či finanční náklady. Právě s rozvojem sporttesterů, které měří energetický výdej, ve spojení se sportovní medicínou vyvstala zajímavá oblast výzkumu, a to validovat přesnost odhadu metabolické aktivity pomocí právě těchto chytrých hodinek.

Na základě bakalářské práce byly vybrány hodinky Garmin Fenix 6X Pro, které se řadí mezi špičková zařízení, která dovedou odhadnout energetický výdej na základě přidružených tělesných funkcí. V této práci se tak blíže zabýváme validitou odhadu metabolické aktivity pomocí výše uvedeného sporttesteru. Pokud by sporttester byl schopen odhadovat metabolickou aktivitu s dostatečnou přesností, našel by uplatnění mimo sportu nejen v technice, ale i např. v medicínských oborech.

Je důležité zmínit, že touto oblastí výzkumu se zabývá velké množství validačních studií. Problémem však je, že v současné době dochází k tak rychlému rozvoji nositelných zařízení, že studie, které jsou staré 7 a více let lze považovat svými výsledky za zastaralé. Tento nový model sporttesteru tak přináší určitou naději z hlediska výzkumu přesnosti odhadu metabolické aktivity.

Cílem práce je tedy validace sporttesteru Garmin Fenix 6X Pro proti nepřímé kalorimetrii reprezentované přístrojem Oxycon Mobile. Jedná se o medicínské přenosné zařízení, které je založeno na analýze exspirovaných plynů. Jsou použita dvě různá zařízení pracující na odlišných principech, nedochází tedy k jejich vzájemnému ovlivnění, a lze vůči sobě hodnoty metabolické aktivity porovnávat [2]. Dílčím cílem byl základní popis metod, které je možno pro odhad metabolické aktivity využít. Důležité je poznamenat metodu odhadu metabolické aktivity na základě srdeční frekvence, ze které z části právě odhad pomocí sporttesterů vychází.

Tato práce přináší velmi zajímavý vhled do problematiky měření metabolické aktivity pomocí nepřímé kalorimetrie, sporttesterů, ale také možnosti testování nositelných přístrojů. Důvodné je zmínit omezení, která mohou negativně ovlivnit výsledky měření, a to nemožnost aklimatizace sporttesteru pro každý měřený subjekt, jelikož se jedná o špičkové sportovní zařízení a většinou není možné pořídit sporttester pro každého probanda. Při testování uvedeném v této práci byl použit k testování pouze jeden sporttester Garmin Fenix 6X Pro vlastněný autorem této práce.

# 1 Termodynamika a přenos tepla

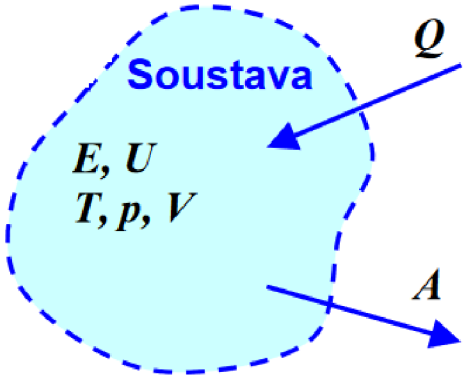
Termomechanika je věda, kterou lze rozdělit na dvě disciplíny termodynamiku a termokinetiku. Termodynamika je jedním ze základních odvětví moderní fyziky [1]. Zkoumá změny stavu termodynamické soustavy vlivem působení tepla a práce [3]. Respektuje při tom základní fyzikální zákon, tj. zákon zachování energie, podle kterého nelze energii vyrobit ani zničit, ale pouze přeměnit na jinou formu, a to interakcí v samotném systému nebo s jeho okolím [4]. Nicméně termodynamika pracuje s konečnými stavy soustav a nezabývá se mechanismy, pomocí nichž je teplo možno získat, ani časovými úseky, kdy k těmto změnám došlo [5].

Termokinetika neboli přenos tepla je vědou, pomocí které lze popsat mechanismy přenosu tepla i časové úseky, kdy k výměně došlo. Zabývá se otázkou, zdali je reálné přenést dané množství tepla ze soustavy nebo do soustavy v reálném čase či pomocí konečné plochy. Pro popis lidského těla jako termodynamického systému je nutné použít poznatky z obou vědních disciplín [5].

Z hlediska fyzikálního je člověk systémem, který neustále vyměňuje hmotu a energii se svým okolím, přijímá energii ve formě potravy, kterou je schopen chemicky přeměnit a dále dle potřeby využít. Vynakládá energii např. na chůzi, dýchání či termoregulaci. Energetické přeměny v lidském těle lze popsat stejnými zákony, jako je přenos tepla mezi teplým a studeným tělesem. Jedná se zejména o I. a II. zákon termomechaniky, které jsou níže popsány, zejména se zaměřením na lidský organismus [1].

## 1.1 Termodynamická soustava

Základním termínem, se kterým termodynamika pracuje, je termodynamická soustava. Jedná se o souhrn látek v prostoru, které jsou účelně omezeny vůči okolí skutečnou, nebo i myšlenou kontrolní plochou. Uvnitř soustavy tak mohou probíhat termodynamické změny. Jsou rozlišovány dva druhy soustav, a to otevřená a uzavřená. Rozdíl je převážně z hlediska průchodnosti hmoty, kdy u uzavřené je hmota procházející přes kontrolní plochu nulová, u otevřené



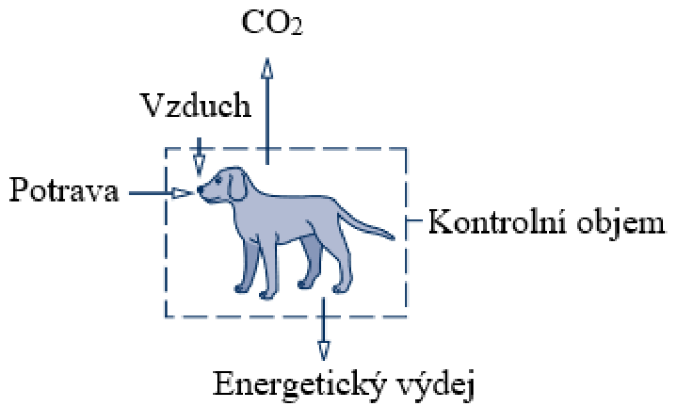

*Obrázek 1 Schéma termodynamické soustavy, upraveno z [3]*

nenulová. Je zřejmé, že lidské tělo je považováno za termodynamickou soustavu otevřenou, jelikož dochází k látkové výměně s okolím [3]. Dále je možno termodynamické soustavy dělit na izolované a neizolované. Přičemž u izolované brání kontrolní plocha výměně tepla Q [J] s okolím. Neizolovaná soustava je jejím opakem, dochází u ní pouze k přenosu tepla, ale nikoli k přenosu látky. Další dělení soustav, které je v termodynamice hojně využíváno, je na homogenní a heterogenní. Pokud jsou vlastnosti soustavy ve všech místech stejné, lze ji označit jako homogenní [3]. Jejím opakem je soustava heterogenní, kdy vlastnosti soustavy nejsou ve všech jejích místech totožné.

Na obrázku 1 je zobrazeno obecné schéma termodynamické soustavy, přičemž Q [J] demonstruje výměnu tepelné energie s okolím, A [J] vnější práci, kterou vykoná soustava. Ostatní fyzikální veličiny jsou uvedeny pro popis dané soustavy (E [J] energie, U [J] vnitřní energie, T [K] termodynamická teplota, p [Pa] tlak, V [$m^3$] objem soustavy).

Některé literární prameny [1] při popisu termodynamických jevů spojených s biologickými procesy živých organismů nahrazují obecný termín „termodynamická soustava“ termínem „termodynamický systém“. Je možné se také setkat s literárními prameny, které oba termíny zaměňují [3]. Termodynamickým systémem lze označit i energetické přeměny v molekulách nebo struktuře molekul.

Dále v diplomové práci je užíván spíše termín termodynamický systém, nicméně z výše uvedeného popisu plyne, že se jedná o individuální pojetí pojmů termodynamický systém a termodynamická soustava. Z hlediska termodynamiky je označován termodynamický systém, viz obrázek 2, jako soubor definovaných jednotek, které jsou vzájemně propojeny určitými vazbami a vztahy [1].




*Obrázek 2 Příklad termodynamického systému, upraveno z [7]*

Termodynamické systémy stejně jako termodynamické soustavy lze tedy opět rozdělit na tři typy [1]:

- Otevřený – může vyměňovat energii i hmotu s okolím.
- Uzavřený – může vyměňovat energii, ale ne hmotu s okolím.
- Izolovaný – nemůže vyměňovat s okolím ani energii ani hmotu.

Lidské tělo lze označit za termodynamický systém otevřený, protože dochází k neustálé výměně energie i hmoty s okolím.

## 1.2 Termodynamické zákony[1]

Mezi nejdůležitější zákon prakticky v každé vědní disciplíně je řazen zákon zachování energie. Tento zákon byl obecně definován Hemholzem v roce 1847 [3]. Pro potřeby termomechaniky byl výše zmíněný zákon definován Robertem Mayerem, přičemž tento zákon je označován jako I. zákon termodynamiky [3].

### 1.2.1 První zákon termodynamiky

První zákon termodynamiky říká, že celkové množství energie v izolované soustavě se nemění, jinak řečeno energii nelze zničit ani vytvořit, ale pouze přeměnit na jinou formu [1]. Tato přeměna se děje pomocí určitého kvantitativního vztahu. Zmíněný zákon je považován za validní, pokud neprobíhají chemické či nukleární reakce [6]. Matematický zápis prvního zákona termodynamiky má dvě formy [3]:

**První forma prvního zákona termodynamiky:**

Pokud dojde k přerušení tepelné a mechanické rovnováhy mezi soustavou a okolím, tedy ke změně vnitřní energie uzavřené neizolované soustavy, a přitom dojde k přenosu tepla mezi soustavou a okolím a také k silovému působení, které se projeví prací vykonanou soustavou (tzv. objemovou), lze popsat změnu vnitřní energie soustavy dle následujícího vztahu *(1.1)*[2] [3]:

$$dQ = dU + dA \tag{1.1}$$

$dQ$ … diferenciální změna tepelné energie,

$dU$ … diferenciální změna vnitřní energie,

$dA$ … diferenciální změna objemové práce.

**Druhá forma prvního zákona termodynamiky:**

V technické praxi je důvodné velmi často používat jiné veličiny než vnitřní energii a objemovou práci. Důležité je zmínit, že obě formy prvního zákona termodynamiky jsou ekvivalentní, nicméně pro praktické využití byla právě odvozena druhá forma prvního zákona termodynamiky [3]. Pro definici druhé formy prvního zákona termodynamiky je nutné nadefinovat termíny entalpie a technická práce.

[1] Termodynamické zákony platí obecně pro termodynamické soustavy, termín termodynamický systém je používán v této diplomové práci ve spojení s lidským tělem.
[2] Písmeno d před značkou označuje diferenciální změnu, tj. dQ je diferenciální změna tepelné energie.

Entalpie[3] je fyzikální veličina H [J], která je stavovou veličinou, přesněji funkcí, stejně jako vnitřní energie. Je rovna změně tepelné energie za konstantního tlaku a níže je uvedena její matematická definice [7]:

$$H = U + pV \tag{1.2}$$

$H$ … entalpie [J],

$U$ … vnitřní energie [J],

$p$ … tlak [Pa],

$V$ … objem [m$^3$].

Technická práce je forma přenosu energie mezi soustavou a okolím. Jedná se o fyzikální veličinu značenou $a_t$ [J/kg] (měrná) nebo $A_t$ [J], která popisuje práci odvedenou na rotační části stroje [3].

Druhou formu prvního zákona termodynamiky tedy lze psát ve tvaru:

$$dQ = dH + dA_t \tag{1.3}$$

$dQ$ … diferenciální změna tepelné energie [J],

$dH$ … diferenciální změna entalpie [J],

$dA_t$… diferenciální změna technické práce [J].

Pro lidský organismus lze uplatnit první zákon v obecné zjednodušené formě uvedené níže [1]:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = Q \pm A \tag{1.4}$$

$\Delta U$ … změna vnitřní energie [J],

$U_2$ … vnitřní energie systému na konci děje [J],

$U_1$ … vnitřní energie systému na počátku děje [J],

$Q$… celková tepelná energie [J],

$A$ … objemová práce [J].

**První zákon termodynamiky pro otevřenou soustavu (systém)**

[3] Pokud přidáme před fyzikální veličinu (entalpii v tomto případě) přídavné jméno měrná, jedná se o danou fyzikální veličinu vztaženou k 1 kg látky. Konkrétně v případě měrné entalpie se jedná o množství energie vztažené na 1 kg látky [J/kg]. V některých případech se lze setkat s tím, že přídavné jméno měrná před fyzikální veličinou znamená její normování k jiné fyzikální veličině (např. ploše). Záleží tedy vždy na kontextu, ve kterém se termín „měrná“ použit.

Lidský organismus lze přirovnat z hlediska termodynamiky k otevřenému termodynamickému systému. V tomto případě je nutné uvažovat kromě přenosu tepla a práce na kontrolní ploše také výměnu látky mezi soustavou a okolím, případně i další typy energií, které s termodynamickým systémem přímo souvisí [3].

Pokud látky prostupují kontrolní plochou mění celkovou energii soustavy, která zahrnuje:

- vnitřní energii U.
- potenciální energii soustavy m.g.z, přičemž m je hmotnost [kg], g gravitační zrychlení [m/s$^2$] a z je výška [m].
- kinetickou energii celku m.w$^2$/2, kde w je rychlost [m/s].

Níže je zapsána obecná matematická formulace prvního zákona termodynamiky pro otevřenou soustavu, viz rovnice *(1.5)* [3]. Rovnice je zapsána v následujícím tvaru: na levé straně jsou zapsány energie, které do soustavy (systému) vstupují, tedy prostupují kontrolní plochou, a na pravé straně jsou energie nejen samotné soustavy, ale také všechny energie, které ze soustavy vystupují [3]:

$$dQ + dm_i\left(u_i + \frac{w_i^2}{2} + g.z_i + p_i.w_i\right) = d\left(U + \frac{m.w^2}{2} + m.g.z\right) + dA + dm_e\left(u_e + \frac{w_e^2}{2} + g.z_e + p_e.w_e\right) \tag{1.5}$$

*dQ*…diferenciální změna tepelné energie do systému (soustavy) vstupující z okolí,

*dm*…diferenciální změna hmotnosti látky,

*u*…měrná vnitřní energie látky,

$\frac{w^2}{2}$…druhá mocnina rychlosti látky (kinetická energie),

$g.z$… součin gravitačního zrychlení a výšky (potenciální energie),

*p.w* … součin tlaku a rychlosti (práce proudu),

*dA*…diferenciální změna objemové práce, kterou koná systém (soustava) jako celek.

Index *i* má látka, která vstupuje do systému, index *e* má látka ze systému vystupující. Bez indexu jsou potom značeny energie (vnitřní, kinetická a potenciální) samotného termodynamického systému potažmo soustavy [3].

### 1.2.2 Druhý zákon termodynamiky

Při bližším zkoumání termodynamických jevů bylo zjištěno, že všechny děje jsou v souladu s I. zákonem termodynamiky, nicméně některé děje jsou lépe proveditelné než ostatní [3]. Právě tuto skutečnost popisuje II. zákon termodynamiky. Ačkoliv teplo může za určitých okolností konat práci, nikdy nemůže dojít k přeměně se 100 % účinností, vždy se energie přemění pouze z části na užitečnou a z části na neužitečnou. Jinou formulací tohoto zákona je, že teplo nemůže samovolně přecházet z chladnějšího tělesa na teplejší [1].

Pro možnost matematického zápisu je nutno zavést další termodynamickou veličinu entropii S [J/K], která je často využívá ve své měrné formě značené písmenem s [J/(kg.K)] [7]. Jedná se o stupeň neuspořádanosti dané soustavy [1], přičemž na ni lze pohlížet také jako na míru samovolnosti dané termodynamické soustavy. Entropie tedy charakterizuje změnu vnitřní energie v systému a klasifikuje, kterým směrem se tato změna bude ubírat. V přírodě probíhají děje samovolné, jsou doprovázeny zvýšením entropie. Níže je uvedena matematická formulace entropie [5]:

$$dS = \frac{dQ}{T} \tag{1.6}$$

$dS$ … diferenciální změna entropie [J/K)],

$dQ$ … diferenciální změna tepelné energie [J],

T … termodynamická teplota [K].

## 1.3 Mechanismy přenosu tepla

Energie nemůže z ničeho vzniknout ani zaniknout, ale lze ji přeměnit na jinou formu [1]. Přenos tepla (termokinetika) je rozsáhlou vědní disciplínou, která se zabývá právě mechanismy přenosu tepelné energie. Je nutné zdůraznit, že se zde pracuje s časově proměnnými veličinami tzv. toky, a to jak hmotnostními, tak častěji s tepelnými[4] [5].

Základní mechanismy přenosu tepla [4]

- Vedení – kondukce
- Proudění – konvekce
- Záření (sálání) – radiace
- Odpařování – evaporace

### 1.3.1 Přenos tepla vedením

Jedná se o mechanismus přenosu tepla, který je spojený zejména s molekulární či atomovou činností [4]. Samotné vedení lze charakterizovat jako přenos energie od částic, které mají více energie, k částicím, které ji mají méně. Podstatný vliv na tento mechanismus přenosu tepla má skupenství látky, tj. zdali jsou nosiči energie atomy nebo molekuly. Obecně je velikost energie těchto částic úzce spojena s jejich teplotou. Existuje-li v látce teplotní gradient, dochází k samovolnému přenosu energie vždy ve směru klesající teploty [5].

Množství přeneseného tepla za jednotku času jednotkovou plochou je charakterizováno měrným tepelným tokem $\dot{q}$. V technické praxi se přenos tepla vedením velmi často zjednodušuje dle dimenzí, ve kterých dochází k majoritnímu přenosu tepla, a to na 1 D vedení, či rovinné 2 D vedení tepla, tj. v ose x a y souřadného systému [5].

[4] Tepelný tok označujeme $\dot{Q}$ [J/s, W], přičemž měrný tepelný tok (hustotu tepelného toku) označujeme $\dot{q}$ [J/(s.m$^2$), W/m$^2$], přičemž v tomto kontextu měrný znamená vztažený k ploše, hmotnostní tok pak $\dot{m}$ [kg/s].

Pro 1D systém lze popsat přenos tepla vedením následujícím zjednodušeným matematickým vztahem tzv. Fourierovým zákonem, viz rovnice *(1.7)*. Vztah je uveden pro celkový tepelný tok přenesený plochou S [$m^2$], což je plocha kolmá na směr tepelného toku [4].

$$\dot{Q} = \lambda S \frac{T_1 - T_2}{L} \tag{1.7}$$

$\dot{Q}$ … celkový teplený tok kolmý k ploše S [W],

S … plocha [$m^2$],

$T_1$, $T_2$… termodynamická teplota [K],

L …vzdálenost míst s teplotami $T_1$ a $T_2$ [m],

$\lambda$… součinitel tepelné vodivosti [W/(K.m)].

### 1.3.2 Přenos tepla prouděním

Přenos tepla konvekcí se skládá ze dvou základních mechanismů. Prvním je přenos tepla pomocí pohybu mikroskopických částic – molekul při ději, který je nazýván difúze [4]. Druhým mechanismem, pomocí kterého je přenášena tepelná energie při proudění, je advekce. Jedná se o makroskopický objemový pohyb tekutiny (proudu). Superpozicí těchto dvou mechanismů vzniká přenos tepla konvekcí [4].

Podle povahy proudění je konvekce klasifikována následovně [5]:

- Nucená – proudění je způsobeno záměrně pomocí technického zařízení.
- Přirozená – jedná se o proudění, které vzniká pouze rozdílnými teplotami těles, přičemž je založena na principu měnící se hustoty plynu s rozdílnou teplotou.
- Kombinovaná – je nejčastějším typem přenosu tepla konvekcí.

Je také důležité zmínit, že oba mechanismy difúze i advekce jsou spojeny s přenosem tzv. „citelného tepla“. Existují však také konvektivní procesy, v nichž vystupuje i přenos latentního tepla, jedná se o procesy spojené se změnou fáze dané látky – var, či kondenzace [5].

Přenos tepla konvekcí lze popsat pomocí Newtonova ochlazovacího zákona [5]:

$$\dot{Q} = \alpha S (T_w - T_\infty) \tag{1.8}$$

$\dot{Q}$ … celkový teplený tok přenesený pomocí konvekce [W],

$\alpha$… součinitel přestupu tepla[5] [W/K.$m^2$],

$S$ … plocha [$m^2$],

[5] Jedná se o součinitel přestupu tepla, který zahrnuje všechny parametry, které ovlivňují konvekci.

$T_w$ … teplota obtékaného tělesa,

$T_\infty$ … teplota tekutiny v dostatečné vzdálenosti od povrchu tělesa.

### 1.3.3 Přenos tepla zářením

Radiace je mechanismus přenosu tepla, který je založen na emitaci energie (tepelného záření) z každého tělesa, které má nějakou konečnou teplotu vyšší než 0 K. Zatímco přenos tepla kondukcí či konvekcí je podmíněn hmotným prostředím, radiace probíhá i v absolutním vakuu [4]. Maximální tepelný tok, který může být emitován je popsán Stefan-Boltzmannovým zákonem, viz rovnice níže [5], přičemž vztah je uveden ve své obecnější podobě:

$$\dot{q} = \sigma T_w^4 \tag{1.9}$$

$\dot{q}$ … měrný tepelný tok [W/m$^2$],

$\sigma$ … Stefan-Boltzmannova konstanta 5,67.10$^{-8}$ [W/m$^2$.K$^4$],

$T_w$…teplota povrchu tělesa [K].

Nicméně vztahem výše lze popsat pouze ideální zářič tzv. černé těleso, které vyzařuje maximální možnou energii. Proto je zavedena nová fyzikální veličina emisivita (poměrná zářivost daného povrchu), která porovnává, jak moc je dané těleso efektivním zářičem v porovnání s černým tělesem, tedy nabývá hodnot 0 až 1.

V praxi se často potkáváme se zářením mezi více tělesy. Je důležité si uvědomit, že září (emitují tepelnou energii) veškerá tělesa, která lze okem spatřit. Pro jednoduchost je níže uveden matematický popis reálného tělesa, které emituje tepelnou energii a je obklopeno velkým homogenním prostorem.

$$\dot{Q} = \sigma\varepsilon(T_w^4 - T_o^4) \tag{1.10}$$

$\dot{Q}$ … celkový teplený tok přenesený pomocí radiance [W],

$\sigma$ … Stefan-Boltzmannova konstanta 5,67.10$^{-8}$ [W/m$^2$.K$^4$],

$\varepsilon$ … emisivita tělesa [-],

$T_w$…teplota povrchu tělesa [K],

$T_o$ … teplota okolí [K].

### 1.3.4 Přenos tepla vypařováním

Jedná se o mechanismus přestupu tepla, které lidské tělo velmi často využívá. Z hlediska přenosu tepla v extrémních (teplých) podmínkách, se tento proces ochlazování lidského těla stává mnohdy nejdůležitějším. Vylučováním potu dochází k ochlazování pokožky lidského těla za účelem odvedení přebytečného tepla z lidského těla. Přenos tepla vypařováním je závislý na okolních podmínkách, přičemž pro možnost odpařování potu je nutné, aby okolní vzduch nebyl

nasycen vlhkostí. Maximální tepelný tok odpařováním z povrchu kůže je popsán vztahem uvedeným níže *(1.11)*, avšak jedná se o matematický vztah, který předpokládá, že je povrch celé kůže zcela mokrý [1].

Matematický vztah *(1.11)* má převážně využití ve výpočetních modelech, kde se používá jako maximální hodnota tepelné energie, kterou by člověk teoreticky měl být schopen pomocí evaporace odvést. Tématikou přenosu tepla za využití evaporace se zabývá velké množství studií a výzkumů, například vývojem simulátoru, který by do výpočetních modelů přenosu tepla aplikoval mokré pocení, se zabývala studie dle GUAN a kol. [8].

$$\dot{E}_{max} = h_e(p_{sk} - p_a) \tag{1.11}$$

$\dot{E}_{max}$… maximální tepelný tok odpařováním [W],

$p_{sk}$… nasycená tenze vodních par při teplotě kůže $t_{sk}$ [kPa],

$p_a$ … parciální tenze vodních par ve vzduchu v okolí [kPa],

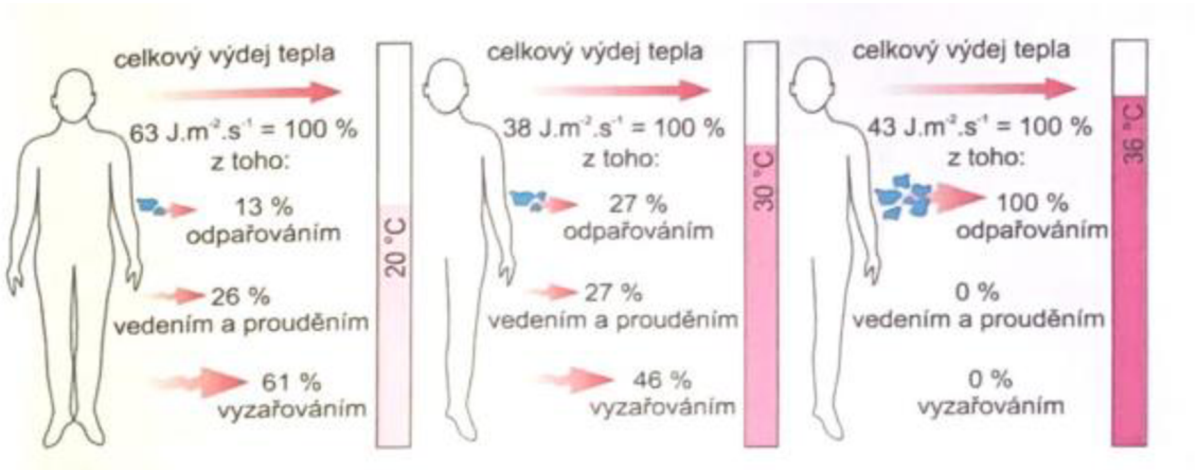
$h_e$… součinitel přestupu tepla odpařováním [W/(m$^2$.kPa)].

### 1.3.5 Přenos tepla dýcháním

Při dýchání dochází nejen k výměně plynů v plicích, ale také k výměně tepla. U zdravého dospělého jedince dosahuje teplosměnná plocha plic cca 100 m$^2$ a fungují tedy také jako výkonný teplosměnný výměník. Při dýchání dochází k výdeji tepla dvěma mechanismy [1]:

- Výdej tepla při dýchání prouděním
- Výdej tepla při dýchání odpařováním

Je zřejmé, že člověk kombinuje mechanismy odvodu tepla v závislosti na okolních podmínkách. Pro ilustraci je níže zobrazeno, viz obrázek 3, porovnání rozdílnosti užití jednotlivých mechanismů u neoblečeného člověka pouze v závislosti na okolní teplotě.




*Obrázek 3 Ztráty tepla u neoblečeného člověka za různých teplotních podmínek, převzato z [1]*

## 1.4 Tepelná rovnováha lidského těla

Lidské tělo produkuje jako každý živý organismus jako odpadní produkt metabolismu neužitečné teplo, které je nutné odvést. Má-li udržovat stálou tělesnou teplotu, je nutné přebytečné teplo odvádět nebo kumulovat v závislosti na okolních podmínkách. V ideálním případě je tepelná bilance lidského těla vyrovnaná. V případě nevyrovnané tepelné bilance lidského těla může docházet k přehřívání či podchlazení. Níže je zobrazena rovnice základní tepelné bilance lidského těla

$$\mathrm{M} - \mathrm{A} \pm \mathrm{R} \pm \mathrm{C} \pm \mathrm{K} - \mathrm{E} = 0 \tag{1.12}$$

*M* … tělem produkované metabolické teplo [J],

*A* … vykonaná mechanická práce [J],

*R* … teplo vyměněné s okolím radiací [J],

*C* … teplo vyměněné s okolím konvekcí [J],

*K* … teplo vyměněné s okolím kondukcí [J],

*E* … teplo odvedené vypařováním potu nebo dýcháním [J].

V ideálních podmínkách musí platit rovnováha mezi teplem, které je odvedeno a které bylo vyprodukováno. V případě, že dochází k větší produkci tepla, než které lidské tělo zvládne odvést, jedná se o tzv. akumulaci tepla v lidském těle. Pokud je vyprodukované teplo nižší než teplo odvedené, jedná se o tzv. tepelný úbytek či tepelný dluh lidského těla. Matematický popis akumulace tepla v lidském těle je popsán níže [1]:

$$S_{AK} = c_b m_b \frac{\Delta t_{re}}{A_D \Delta \tau} \tag{1.13}$$

$S_{AK}$… množství tepla akumulovaného v organismu za jednotku času [W/m$^2$],

$c_b$ … průměrná měrná tepelná kapacita lidského těla 3,47 [kJ/°C.kg],

$m_b$… hmotnost lidského těla [kg],

$\Delta t_{re}$ … změna rektální teploty [°C],

$\Delta \tau$ … čas [s],

$A_D$… plocha lidského těla [m$^2$], obvykle je počítána dle DuBoise [9], viz rovnice *(1.14)*

$$A_D = 0{,}202 . m_b^{0{,}425} . h_b^{0{,}725} \tag{1.14}$$

$A_D$… plocha lidského těla [m$^2$],

$m_b$ … hmotnost člověka [kg],

$h_b$ … výška člověka [m].

Aby nedocházelo k úbytku či zvyšování hmotnosti lidského těla, je nutné, aby existovala rovnováha mezi přijatou energií a energetickým výdejem. Taktéž musí existovat i tepelná rovnováha lidského těla, aby nedocházelo ke hromadění tepelné energie v lidském těle, ale ani k jejímu úbytku [1], což v extrémních případech (přehřátí, podchlazení) může vést i k životu ohrožujícím stavům.

# 2 Biologický náhled na problematiku

Člověka z biologického hlediska řadíme do živočichů teplokrevných tzv. homoiotermních. Znamená to, že člověk má snahu udržovat stálou tělesnou teplotu bez ohledu na vnější podmínky. Schopnost člověka udržovat si stálou teplotu tělesnou jádra je evoluční výhodou, nicméně je spojena s velkou energetickou zátěží [10].

## 2.1 Metabolismus

V lidském těle probíhá velké množství procesů, které pomáhají udržovat normální tělesné funkce a také účinně regulovat chemické látky nazývané enzymy. Hlavním úkolem enzymů, je moderovat chemické reakce probíhající v lidském organismu, naproti tomu hormony se převážně starají o správný růst a využívání energetických zásob [11]. Metabolismem neboli látkovou přeměnou se rozumí organizovaný soubor chemických reakcí probíhajících v lidském organismu, pomocí nichž je získávána energie a základní stavební materiál pro výstavbu samotného lidského těla [12].

Metabolismus zahrnuje dva typy dějů:

- Katabolické
- Anabolické

Katabolismus představuje rozklad cukrů, tuků, bílkovin, ale i mrtvých buněk či tkání za současného uvolnění energie [11]. Jedná se o tzv. disimilace (rozkladné štěpení), při nichž vznikají ze složitých látek (sacharidy, lipidy bílkoviny) látky jednodušší (kyselina pyrohroznová, octová, $CO_2$, $H_2O$, $NH_3$ a močovina) [12]. Hlavním úkolem katabolismu je postupné uvolňování energie. Tato energie je následně ukládána v lidském těle ve formě ATP (adenosintrifosfát).

Anabolismus zahrnuje převážně konstruktivní procesy, při kterých jsou složky potravy přeměny na energii, kterou lze v lidském těle využít k růstu jednotlivých tkání [11].

Metabolismus probíhá už na úrovni lidských buněk pomocí tzv. Krebsova cyklu. Zjednodušeně lze napsat, že Krebsův cyklus[6] je srdcem energetického metabolismu buňky tzn. nějakým způsobem se na něj napojují jednotlivé dráhy energetického metabolismu. Krebsův neboli citrátový cyklus, je velmi složitý proces a nelze u něj určit, jestli se jedná o katabolismus nebo anabolismus [13]. Probíhá v mitochondriích a tvoří majoritní část intermediárního metabolismu.

Intenzitu rychlosti metabolismu ovlivňuje především [14]:

- tělesná práce,
- specifický dynamický účinek stravy,
- vnější teplota,
- tělesné parametry,
- pohlaví,

[6] Krebsův cyklus téže nazýván citrátový cyklus je považován za největší zdroj energie pro lidský organismus. Je společnou drahou pro lipidy, sacharidy i proteiny, což jsou hlavní složky lidské potravy. Produktem Krebsova cyklu je ATP nebo adenosintrifosfát, což je látka, kterou je lidské tělo schopné zpracovat a dále využít. Krebsův cyklus má spíše katabolický (rozkladný charakter) i když jsou mnohé jeho meziprodukty použity k syntéze jiných látek [93].

- věk,
- tělesná teplota,
- hladina hormonů v těle,
- stres,
- malnutrice[7].

### 2.1.1 Bazální metabolismus

Bazální metabolismus představuje základní minimální energetický výdej organismu nutný pro zajištění správného fungování všech tělesných orgánů při teplotně neutrálních podmínkách, v absolutním klidu bez příjmu potravin a bez vykonávání jakékoli činnosti [1]. Hodnota energetického výdeje bazálního metabolismu je označována BMR[8], přičemž existuje velké množství predikčních rovnic, pomocí kterých lze tuto hodnotu u člověka odhadovat. Mezi nejznámější jsou řazeny rovnice uvedeny níže, dle Harrise a Benedicta [15] pro muže *(2.1)* a ženu *(2.2)*.

$$BMR = 66{,}5 + 13{,}8.m_b + 5{,}0.h_b - 6{,}8.r \qquad (2.1)$$

$$BMR = 655 + 9{,}6.m_b + 1{,}8.h_b - 4{,}7.r \qquad (2.2)$$

*BMR* … bazální metabolický výdej [kcal/den],

$m_b$ … tělesná hmotnost [kg],

*r* … věk v letech,

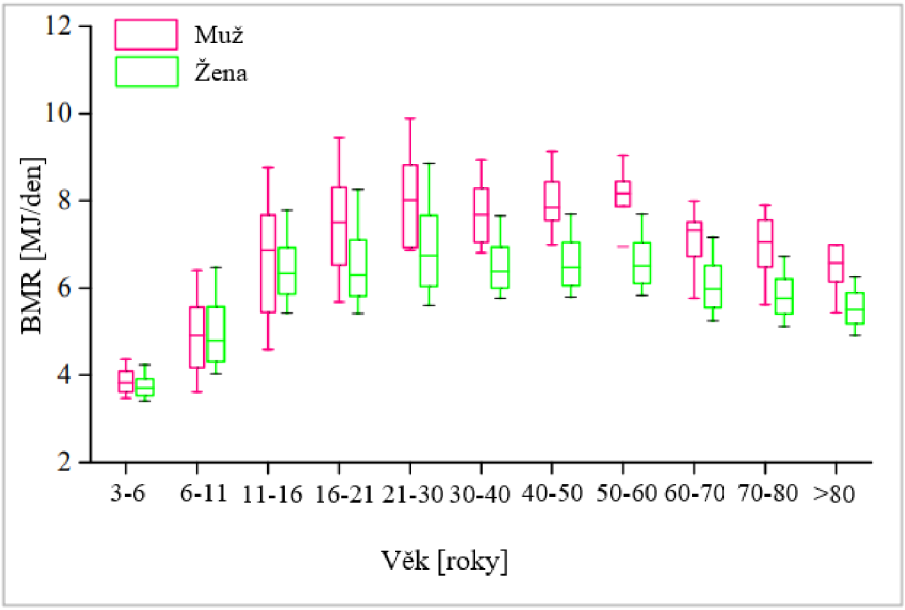
$h_b$ … výška v [cm].

Hodnotu energetického výdeje bazálního metabolismu lze odhadnout z výše uvedených vztahů, nicméně je nutné zdůraznit, že hodnota BMR závisí i na řadě dalších faktorů. K přesnému měření se používá přímá kalorimetrie, což je laboratorní metoda k určení přesného energetického výdeje. Samotná hodnota BMR klesá při spánku, a to asi o 10 % a při dlouhodobém hladovění může klesnout až o 40 % [1]. Na obrázku 4 je zobrazeno zkoumání dle autorů LUO a kol. [16]. Na tomto obrázku je zobrazen výrazný vliv věku a pohlaví měřených subjektů na hodnotu BMR. Dle studie největší hodnoty BMR dosahuje lidský organismus mezi 21-30 rokem života, a to shodně u obou pohlaví.

Za povšimnutí stojí i hodnota BMR v dětství, kdy z obrázku 4 je patrné, že téměř totožné hodnoty metabolické aktivity vykazují děti pro obě pohlaví až do věku cca 11 let. Poté s nástupem dospívání dochází k prudké změně a odlišení tělesných proporcí jednotlivých pohlaví, což se podepisuje na rozdílnosti klidové hodnoty metabolismu BMR.

---

[7] Malnutrici lze obecně definovat, jako špatný stav výživy. Vzniká při nedostatečném příjmu živin vzhledem k aktuálním potřebám lidského organismu. Zajímavostí je, že tento problém se nejedná pouze „hubených“, ale může se týkat také jedinců s vyšší tělesnou hmotností [98].
[8] BMR = Basal Metabolic Rate

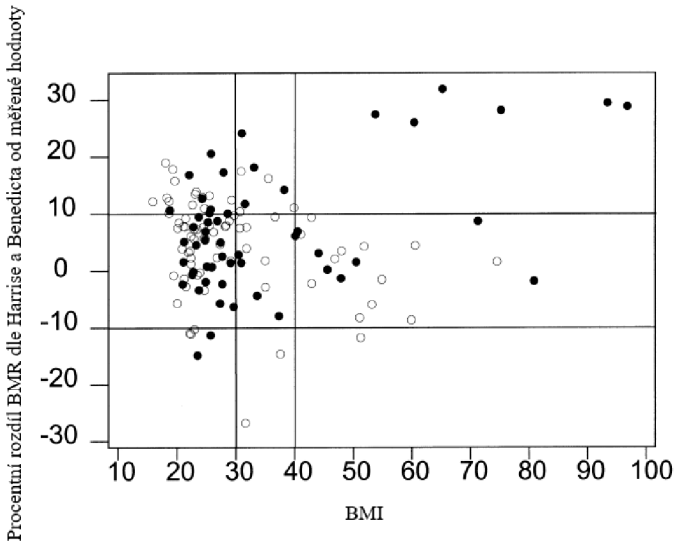



*Obrázek 4 Závislost BMR na věku, upraveno z [16]*

Dle studie HENRY a spol. [17], která pojednává mimo jiné o měření bazálního energetického výdeje, je nutné pro zjištění hodnoty BRM splňovat níže uvedené podmínky.

1. Subjekt by měl být úplně v klidu, a to před zahájením měření i během něj. Měl by v klidu ležet a být vzhůru.
2. Měřený subjekt by měl být nalačno, alespoň 10-12 hodin před zahájením měření.
3. Prostředí, ve kterém se měření provádí, by mělo být teplotně neutrální (21-26 °C), aby nedocházelo ke zvýšené/snížené produkci tepla.
4. Subjekt by měl být bez emočního stresu.

Studie dle FRANKENFIELD a kol. [18] se zabývala validací predikční rovnice dle Harrise a Benedicta [15] pro skupinu 130 osob. Níže na obrázku 5 jsou uvedeny rozdíly měřeného a odhadovaného bazálního metabolismu, přičemž na svislé ose je vyobrazena procentuální odchylka od měřené hodnoty a na ose vodorovné index tělesné hmotnosti. Plnými kolečky jsou zobrazeny testované mužské subjekty, prázdnými ženy. Z obrázku 5 je patrné, že pro neobézní část zkoumaného souboru vykazuje odhad BMR z predikčních rovnic dostatečně přesné výsledky.




*Obrázek 5 Přesnost odhadu BMR pomocí Harris-Benedictovy rovnice, upraveno z [18]*

BODY MASS INDEX

Index tělesné hmotnosti BMI je metrika, která se v současnosti používá pro definování antropometrických charakteristik (výšky/hmotnosti) u dospělých a pro jejich kategorizaci do skupin. Slouží tak nejen ke zhodnocení váhy jedince, ale také k predikci rizikovosti zdravotních problémů [19].

Pro výpočet hodnoty BMI slouží jednoduchý výpočetní vztah dle následující rovnice:

$$BMI = \frac{m_b}{{h_b}^2} \tag{2.3}$$

*BMI* …index tělesné hmotnosti [kg/m$^2$],

$m_b$ … hmotnost jedince [kg],

$h_b$ … výška jedince [m].

Níže je uvedena klasifikace jedinců dle BMI dle WHO [20].

*Tabulka 1 BMI index*

| **BMI** | **Kategorie** | **Zdravotní rizika** |
|---|---|---|
| Méně než 18,5 | Podváha | vysoká |
| 18,5 - 24,9 | Norma | minimální |
| 25,0 - 29,9 | Nadváha | nízká až lehce vyšší |
| 30,0 - 34,9 | Obezita 1. stupeň | zvýšená |
| 35,0 - 39,9 | Obezita 2. stupeň | vysoká |
| 40,0 a více | Obezita 3. stupeň | velmi vysoká |

### 2.1.2 Klidový energetický výdej

Jedná se energetický výdej, který je nutný pro udržení všech tělesných funkcí, když je tělo v klidovém režimu. Hodnota energetického výdeje klidového metabolismu je označována zkratkou RMR[9] [21]. Klidový energetický výdej je asi o cca 10 % vyšší než bazální metabolický výdej [1]. Měření hodnoty RMR [21] se provádí nejméně po třiceti minutách klidného ležení a dvě hodiny po jídle. Lze jej měřit pomocí přímé či nepřímé kalorimetrie nebo odhadovat např. pomocí rovnic MIFFLIN a kol. [22] uvedených níže pro muže *(2.4)* pro ženu *(2.5)*.

$$RMR = 10.m_b + 6{,}25.h_b - 5.r + 5 \tag{2.4}$$

$$RMR = 10.m_b + 6{,}25.h_b - 5.r - 161 \tag{2.5}$$

*RMR* … klidový energetický výdej [kcal/den],

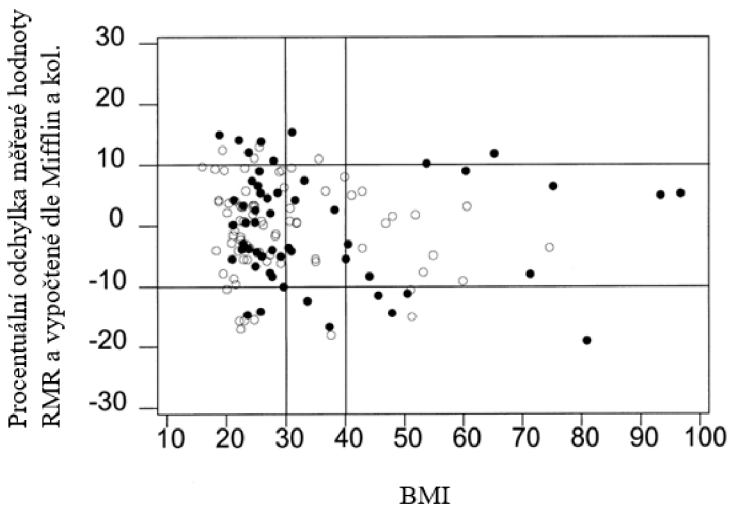
$m_b$ … tělesná hmotnost [kg],

*r* … věk [roky],

$h_b$ … výška v [cm].

Dle studie MCMURRAY a kol. [23] představuje RMR největší část celkových energetických potřeb. Hodnota RMR byla měřena v sedě nebo v leže na zádech po nejméně 15 minut. Obecně je hodnota RMR považována za lepší ukazatel denního energetického výdeje než hodnota BMR.

Studie dle FRANKENFIELD a kol. [18] se zabývala validací predikčních rovnic dle MIFFLIN a kol. [22], které odhadují hodnotu klidového energetického výdeje RMR. Na obrázku 6 jsou

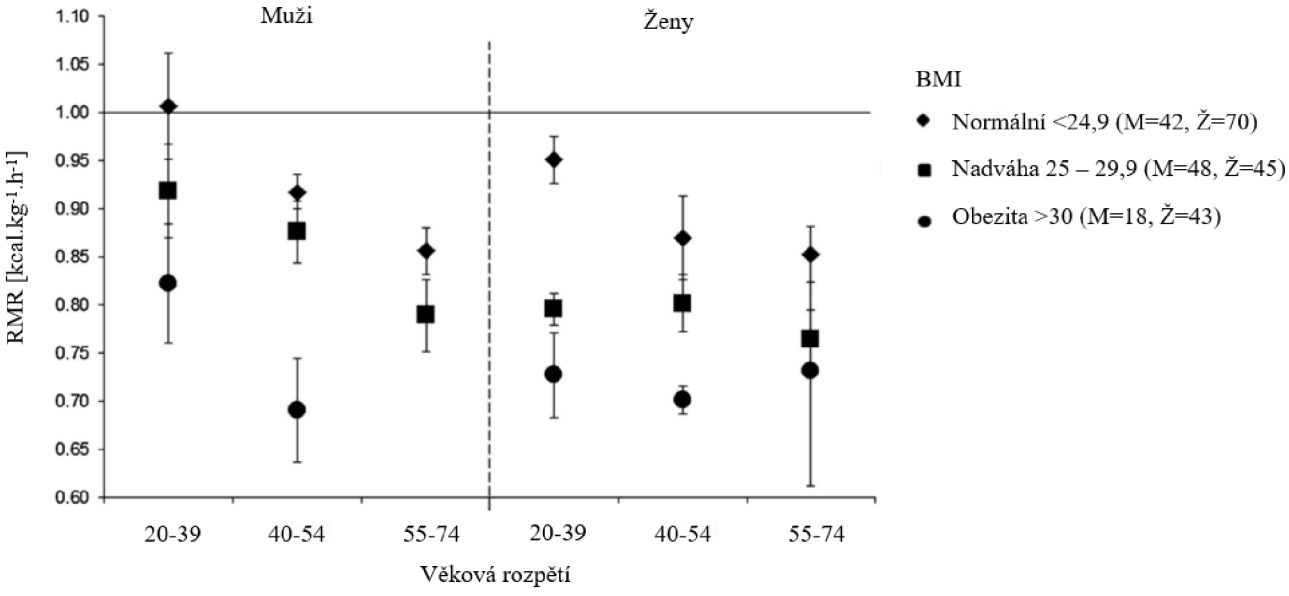



*Obrázek 6 Validace Mifflinovy rovnice, upraveno z [18]*

[9] RMR = Resting Metabolic Rate

zobrazeny odchylky měřené hodnoty RMR a vypočtené dle predikčních rovnic. Prázdnými kolečky jsou zobrazeny subjekty ženského pohlaví a plnými mužského. Na svislé ose je tedy zobrazena procentuální odchylka, přičemž za přesný odhad se považuje ten, který je v mezích 10 %. Na vodorovné ose je zobrazen BMI index měřených subjektů [18].

RMR je ovlivněno také jako BMR velkým množstvím faktorů. Níže je zobrazen obrázek 7, který vykresluje vliv věku, pohlaví a BMI indexu na klidový energetický výdej [23]. Na svislé ose je zobrazen RMR v [$kcal.kg^{-1}.h^{-1}$]. Na vodorovné ose je zobrazeno rozřazení měřených subjektů dle pohlaví a věkových skupin. Výzkumu se celkem účastnilo 108 subjektů mužského pohlaví a 158 ženského.




*Obrázek 7 Vliv věku a BMI na hodnotu klidového metabolismu, upraveno z [23]*

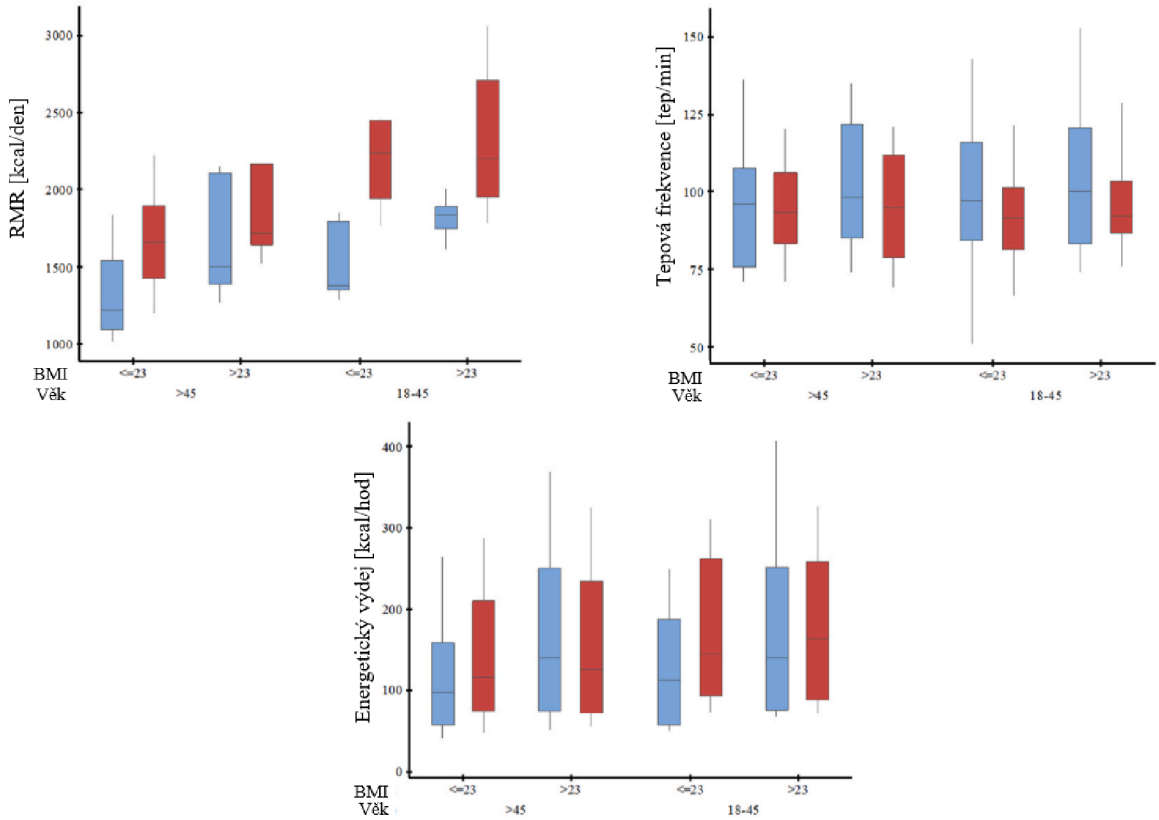
Z obrázku 7 [23] je patrné, že nejvyšší hodnoty RMR dosahují subjekty mužského pohlaví s normálním BMI indexem ve věku 20–39 let. Nicméně testované subjekty s nadváhou dle ukazatele BMI nevykazují velký propad v hodnotě RMR, dokonce se intervaly chybových úseček překrývají. To však nelze aplikovat pro ženské pohlaví, kde pro věkovou skupinu 20–39 je shledána nejintenzivnější závislost hodnoty RMR právě na BMI. Obecně lze říci, že u mužů ve věkové skupině 20–39 není tak významná závislost RMR na hodnotě BMI, jako je tomu u žen.

Pro věkovou skupinu 40–54 let už jsou hodnoty RMR ovlivňovány tělesnou stavbou téměř totožně u obou pohlaví. Totéž platí také pro věkovou skupinu 55–74 let.

Velikost hodnoty RMR však nezávisí pouze na výše uvedených parametrech. Vlivem denní doby na velikost RMR se zabývala studie dle HAUGEN a kol. [24]. Ve studii vystupovalo 12 zdravých mužských subjektů a 25 ženských subjektů ve věku 21–67 let s BMI 17–34. V každém dni byla u všech subjektů změřena hodnota RMR vždy ráno a odpoledne. Všechny testované subjekty vykazovaly vždy navýšení klidového energetického výdeje během dne. Ranní hodnota byla 1509,7 ± 33,7 kcal/d a odpolední 1597,9 ± 32,5 kcal/d. Mezi první a druhou návštěvou byly shledány zanedbatelné rozdíly v hodnotě RMR [24].

Níže na obrázku 8 jsou zobrazeny statistické výsledky závislosti RMR, tepové frekvence a energetického výdeje na BMI indexu a věku, přičemž modrou barvou jsou zobrazeny ženské subjekty a červenou mužské. Lze pozorovat významnou závislost RMR na pohlaví a velikosti BMI indexu, dále také velké chybové úsečky při stanovení závislosti srdečních tepů na BMI indexu a věku. Tyto chybové úsečky naznačují právě individuálnost jedince, kdy se do tepové frekvence promítají výrazně také vrozené dispozice daného jedince [25].

Dále lze také pozorovat, že energetický výdej nezanedbatelnou měrou závisí na věku zkoumaného subjektu, a to nejen klidový. Tuto skutečnost lze pozorovat ze závislosti energetického výdeje na indexu BMI a věku, kdy u subjektů se stejným BMI indexem, ale rozdílného stáří byl při totožné prováděné činnosti měřen odlišný energetický výdej [25].




*Obrázek 8 Závislost RMR, tepové frekvence, energetického výdeje na BMI a věku zkoumaného jedince [25]*

Někdy se setkáváme, že se velikost energetického výdeje označuje pomocí jednotky MET[10]. Tato jednotka je charakteristická pro metabolickou aktivitu, nicméně často je používána ve spojení obecně s energetickým výdejem. Koncept označování dle MET je již nějakou dobu znám, nicméně odkud přesně vznikl není jasné. Konvenční definice jednotky MET pro energetický výdej je 3,5 ml kyslíku na kilogram tělesné hmotnosti za minutu (3,5 $ml.kg^{-1}.min^{-1}$) [23].

### 2.1.3 Hodnota VO2max

Při hodnocení tělesné zdatnosti je často skloňována hodnota $VO_{2max}$. Jedná se o maximální spotřebu kyslíku, tedy maximální kapacitu kardiovaskulárního systému tak, aby dovedl

[10] MET = The Metabolic Equivalent

zásobovat kyslíkem pracující svalstvo během trvalého zatěžování. Tato hodnota je považována za zlatý standard pro určování fyzické zdatnosti. Jedná se také o důležitý ukazatel zdravotních rizik spojených s rozvojem kardiovaskulárních onemocnění. Bylo prokázáno, že zlepšení hodnoty $VO_{2max}$, mělo významný příznivý vliv na snížení zdravotních rizik, jelikož došlo ke snížení krevního tlaku a zvýšení citlivosti na inzulín [26].

Testované subjekty lze klasifikovat právě podle hodnoty $VO_{2max}$. Tuto hodnotu je možné měřit pomocí spirometrie nebo odhadovat na základě přidružených tělesných funkcí. Pro odhad hodnoty $VO_{2max}$, existuje také velké množství metod, přičemž za zmínku stojí metoda dle GAO a kol. [27], která popisuje odhad této hodnoty pomocí Firstbeat[11] fitness testu. Toto zjištění je důležité, jelikož firma Garmin hojně technologii Firstbeat využívá.

Sportestr Garmin Fenix 6X Pro je právě také díky této metodě schopen odhadnout hodnotu $VO_{2max}$, přičemž tento odhad zpřesňuje v závislosti na délce aklimatizace přístroje.

## 2.2. Tělesná teplota a termoregulace

Normální teplota lidského těla se pohybuje v rozmezí 35,6 –37 °C. O regulaci teploty lidského těla v tomto rozmezí se stará část mozku zvaná hypothalamus. Ten funguje na principu zpětné vazby jako termostat ústředního topení [28].

V některých literárních pramenech je možno narazit na termín teplota tělesného jádra. Tím se rozumí teplota hlubokých tkání, jež se tělo snaží udržovat stále i za extrémních podmínek. Tím se liší od teploty povrchu lidského těla, která se v závislosti na externích podmínkách mění [10]. Údaj o teplotě lidského jádra patří mezi základní diagnostické údaje stavu organismu. Nicméně, je nutné upozornit na fakt, že teplota lidského těla během dne kolísá a u žen se tomu také tak děje také ve spojitosti s měsíčním cyklem [1].

### 2.2.1 Měření tělesné teploty

K měření teploty lidského těla se využívají nejrůznější metody. Je zřejmé, že pro určení teploty lidského jádra, by bylo optimální měřit teplotu uvnitř tkání, aby nedocházelo k ovlivnění okolními podmínkami. Při podrobnějším zkoumání byly však zjištěny rozdíly v teplotách jednotlivých lidských orgánů, protože závisí na hustotě krevní sítě. Pro měření lidské teploty se nejčastěji tedy používají teploměry či teplotní sondy, avšak záleží na aplikaci. Metody, při kterých je nutné zavést teplotní sondu přímo do lidského těla, se nazývají invazivní [1]. Podrobněji se metodami měření zabývá norma ČSN EN ISO 9886 [29], ve které jsou postupy měření popsány. Dle účelu je možné se setkat s následujícími teplotami [1]:

- Orální teplota – je snadno měřitelná, používá se jako orientační ve zdravotnictví i domácnostech. Významnými vlivy jsou kouření či pitný režim. Měří se teplotní sondou umístěnou ke kořeni jazyka.
- Axilární teplota – je rovněž měřitelná běžnými lékařskými teploměry.
- Tympanální teplota – využívá toho, že vnitřní orgány a hlava jsou dobře prokrvovány, a tak je jejich teplota velmi blízká. Jedná se o měření pomocí speciálních teplotních sond uvnitř vnitřního ucha.

[11] Firstbeat označuje metodu či algoritmus výpočtu energetického výdeje. Této metody částečně využívají při svém odhadu také sporttestery Garmin, přičemž užití této metody zaručuje vhodnost použití pro odhad energetického výdeje pro sportovce, ale i netrénované jedince [96].

- Rektální teplota – jedná se o teplotu, která je považována za nejvíce se blížící teplotě tělesného jádra. Její měření má však intimnější charakter, jelikož je měřitelná pouze pomocí invazivních metod.
- Nitrobřišní (intraabdominální teplota) – měří se pomocí speciálního teplotního čidla, které se dostane do lidského těla pomocí pilulky, kterou měřený subjekt spolkne. Avšak teplota se může mírně lišit v závislosti na tom, kde v trávícím traktu se teplotní čidlo nachází.
- Kožní teplota – pro měření teploty kůže je nutné, aby byl měřený subjekt na daném místě obnažen. Závisí významně na externích podmínkách a také na místě, na kterém je měřena. Zavádí se proto tzv. střední teplota kůže, což bývá váhový průměr teplot z míst, která jsou přesně definována [29] [1].

### 2.2.2 Termoregulace a mechanismy jejího řízení

Můžeme se setkat také s pojmem, že lidské tělo udržuje své vnitřní prostředí ve stavu fyzikální a chemické rovnováhy v tzv. stavu homeostáze [11]. Konkrétně je důležité, aby v lidském těle byl udržován konstantní tlak a chemické složení. Jelikož je člověk živočichem teplokrevným, musí také udržovat stálou tělesnou teplotu ve výše uvedeném rozmezí tj. 35,6 –37 °C. Proces, kterým řídí lidské tělo svou teplotu se nazývá právě termoregulace [28].

V případech, kdy z nějakého důvodu nefunguje termoregulace správně, může docházet k hypotermii, což nastane, když teplota tělesného jádra klesne pod 35 °C, naopak tzv. hypertermie nastane v případě, když teplota jádra překročí 40 °C [1]. Při těchto případech by měly termoreceptory, což jsou speciální nervová zakončení, vyslat impulz do hypothalamu, který má pro řešení těchto situací následující mechanismy [11]:

Mechanismy pro snížení odvodu tepla do okolí [11]:

- Vazokonstrikce – při nízkých teplotách dochází ve vnějších vrstvách kůže ke stažení tepének, čímž dojde ke snížení průtoku krve a odvádění tepla do okolí.
- Svalový třes – pomocí svalového třesu dochází ke generování tepelné energie.
- Chemická termogeneze – působením hormonů může docházet k větší produkci tepelné energie svalstvem [1].

Mechanismy pro zvýšení odvodu tepla do okolí [11]:

- Vazodilatace – jedná se o schopnost kůže, kdy dojde k roztažení tepének procházejících v jejích horních vrstvách, a tím ke zvýšení průtoku krve a také i k odvodu tepla.
- Pocení – je to produkt potních žláz, jehož základem je tekutina podobná plazmě. Maximální rychlost pocení je asi 1,7 l/h při zvýšené fyzické aktivitě. Vlivem odpařování potu dochází k odvodu tepla do okolí, ale pouze za předpokladu, že okolní prostředí není ze 100 % nasyceno vlhkostí [1].

# 3 Metabolické teplo a metabolická aktivita

Zkoumáním energetického výdeje se lidé zabývali už od nepaměti. Nicméně v obdobích před technologickým rozvojem bylo zkoumání spíše založeno na alchymii. Až v průběhu minulého století se vytyčila vědní disciplína respirometrie, která právě popisovala závislost energetického výdeje na spotřebě kyslíku. Významný fyziolog Max Kleiber nazval aerobní metabolismus „ohněm života“ a z toho respirometrii „měřením ohně života“, protože energetický výdej lze přirovnat k ohni, díky kterému může lidské tělo fungovat [30].

Metabolické teplo vzniká v lidském organismu při chemické látkové přeměně. Níže je označováno metabolické teplo jako energetický výdej (EE[12]), jedná se o hodnotově velmi podobnou energetickou veličinu, jen pokud se zmiňujeme o teple, tak uvažujeme jednotku joule [J], u energetického výdeje je častější jednotkou kilokalorie, či kilokalorie za minutu [kcal, kcal/min]. Celkový energetický výdej je tvořen třemi základními složkami [1]:

- Energií nutnou ke zpracování potravy – závisí na přijaté potravě.
- Mechanická výkonnost svalové práce – tzv. užitečná práce.
- Bazální metabolismus.

Jelikož energie nutná ke zpracování potravy tvoří asi 5-10 % z celkového energetického výdeje a mechanická výkonnost svalové práce je také u běžných činností (ležení, sezení) nízká, lze celkový energetický výdej považovat za metabolické teplo produkované lidským organismem dle ČSN EN ISO 8996 [31].

Velikost energetického výdeje je poměrně dobrým a důležitým faktorem určující komfort nebo zátěž související s vnějším prostředím. Určení přesné hodnoty energetického výdeje má smysl z důvodu posuzování klimatu pracovního prostředí, aby se předcházelo možnému přehřátí či podchlazení. Nicméně energetický výdej je sledován také při sportovních výkonech či pro zdravotní aplikace [1].

Právě energetický výdej je však energetická veličina, která je silně subjektivní záležitostí. Ovlivňuje ji velké množství faktorů, jako například váha, výška, množství tělesného tuku, BMI, či genová vybavenost měřeného subjektu. Aby bylo možné jedince nějakým způsobem kvantifikovat byla zavedena energetická veličina metabolická aktivita[13].

Metabolická aktivita je energetickou veličinou, úzce související s metabolickým teplem. Každý měřený subjekt má při přesně definovaných podmínkách různý energetický výdej, což je způsobeno rozdílnými proporcemi testovaných subjektů. Z těchto důvodů je energetický výdej vyjádřen dle níže uvedených veličin, které mají za cíl, co možná nejvíce jednotně kvantifikovat měřené subjekty [1], nicméně je nutné zmínit, že stále závislost na tělesných parametrech a fyzické kondici zcela nevymizí:

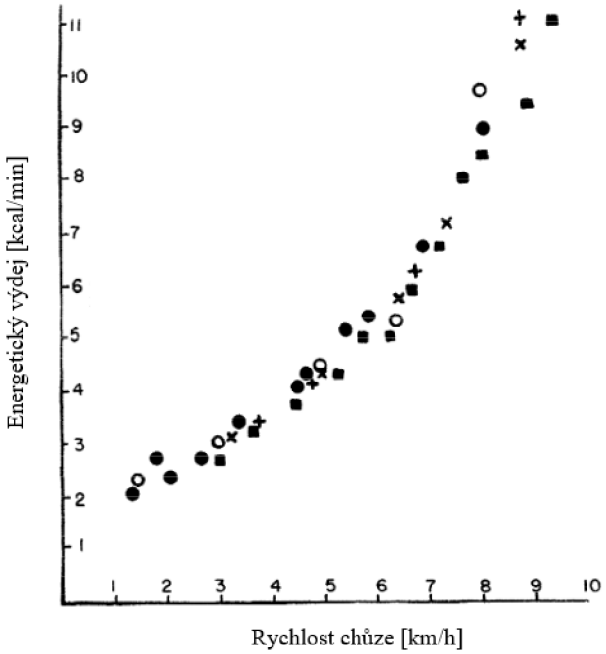
- tepelný výkon TP průměrného člověka [W],

[12] Energetický výdej z anglického Energy Expediture (EE), je možné se také setkat s TEE, což označuje totální energetický výdej Total Energy Expediture.
[13] Metabolická aktivita – Metabolic Rate [MR] vyjadřuje množství metabolického tepla za daný čas pro vypočtenou plochu lidského těla. Nejčastěji se udává v jednotkách MET, je možné ji uvádět i [W/m$^2$], často je také nazývána rychlostí metabolismu.

- tepelný výkon nebo tepelný tok na jednotku plochy tělesného povrchu [W/m$^2$],
- metabolická aktivita MR [MET], kde 1 MET = 58,2 W/m$^2$.

## 3.1 Vliv intenzity pohybu na energetický výdej

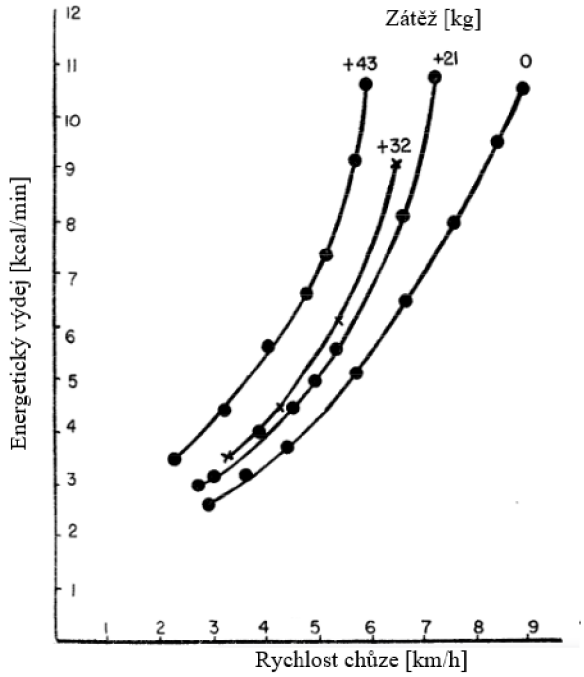
Metabolická aktivita je vstupním parametrem do velkého množství predikčních rovnic a modelů, které dovedou predikovat tepelnou zátěž organismu. Je zřejmé, že metabolická aktivita přímo závisí na energetickém výdeji, který závisí na činnosti, kterou měřený subjekt provádí. Nezávisí však pouze na typu činnosti, ale na intenzitě, se kterou je daná činnost prováděna, viz studie autorů PASSMORE a DURNIN [32], kteří vypracovali rozsáhlý výzkum, který právě hodnotí závislost energetického výdeje na intenzitě prováděné fyzické aktivity, viz obrázek 9.




*Obrázek 9 Závislost energetického výdeje na intenzitě pohybu, upraveno z [32]*

Na obrázku 9 [32] je patrné, že se zvyšující se intenzitou pohybu, v tomto případě rychlosti chůze, se zvyšuje energetický výdej měřeného subjektu. Rozdílné symboly jsou v grafu uvedeny z důvodu publikovaných výsledků z více studií. Je zřejmé, že se nejedná o lineární závislost, a proto právě intenzita pohybu má výrazný vliv nejen na metabolickou aktivitu, ale i na tepelný komfort jedince. Při měření metabolické aktivity je tedy nutno brát velký důraz právě na intenzitu daného pohybu, kterou lze např. kvantifikovat jako v případě chůze rychlostí prováděné aktivity.

Intenzitu pohybu tělesné aktivity však lze změnit nejen vyšší rychlostí, ale také zvýšenou zátěží. Tímto vlivem se také zabývala také studie dle PASSMORE a DURNIN [32], ze které je obrázek 10. Z tohoto obrázku je patrné, že při vyšší zátěži a nižší rychlosti pohybu je energetický výdej měřeného subjektu vyšší, než při vyšší rychlosti a nižší zátěži. Z tohoto důvodu je také nutné definovat měřené podmínky včetně zátěže, se kterou bude daná aktivita prováděna.



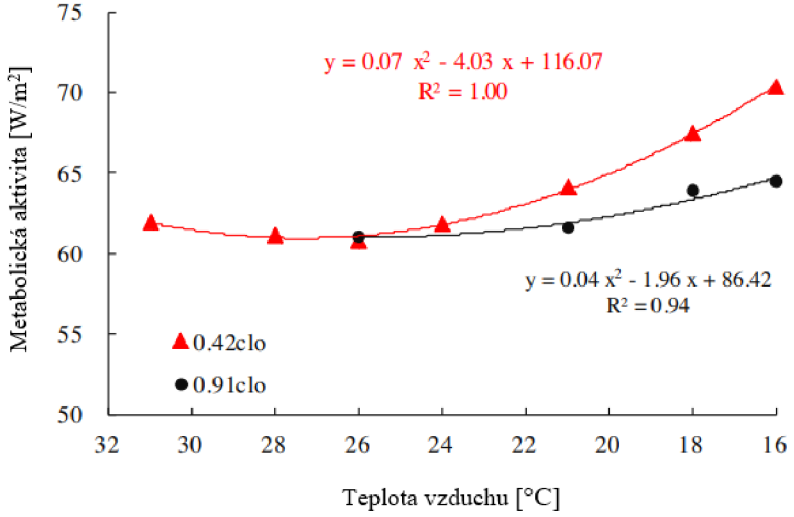

*Obrázek 10 Závislost energetického výdeje na rychlosti chůze a tělesné zátěži, upraveno z [32]*

## 3.2 Vliv oblečení a okolní teploty na MR

Tepelná pohoda prostředí neboli tepelný komfort je v současné době velmi skloňovaným tématem. Dle ASHRAE [6], je tepelná pohoda definována jako stav mysli, který vyjadřuje spokojenost člověka s daným teplotním mikroklimatem a který vychází ze subjektivního hodnocení daného měřeného subjektu. Existují tzv. diagramy tepelné pohody, díky kterým lze posoudit vliv jednotlivých činitelů na tepelnou pohodu člověka [33]. Vstupujícím parametrem do těchto diagramů je opět metabolická aktivita, kterou je nutné přesně stanovit nebo odhadnout v závislosti na předchozích zkušenostech.

Vlivem okolní teploty na metabolickou aktivitu se zabývala studie dle LUO a kol. [34]. V této studii byl zkoumán vliv vnější teploty na rychlost metabolismu pro dva oděvy s přesně definovaným tepelným odporem. Měnící se trend rychlosti metabolismu lze dle výsledků rovnice vyjádřit pomocí polynomiální funkce druhého řádu. Je zde kladen důraz na tepelný pocit měřeného subjektu, kdy výchozí hodnota metabolické aktivity byla měřena při neutrálním tepelném pocitu subjektu. Měření bylo prováděno u subjektů, které byly nejméně 20 min v klidovém stavu. Ze zkoumání bylo zjištěno, že při pocitu chladu byla zvýšena metabolická aktivita o 16,6 % oproti výchozí hodnotě [34].

Na obrázku 11 lze vidět závislost metabolické aktivity na teplotě okolního vzduchu pro dva typy oblečení o přesně definovaném odporu 0,42 clo a 0,9 clo. Je patrné, že při nižší teplotě okolí dochází k výraznějšímu projevu závislosti metabolické aktivity na typu oblečení, jelikož lidské tělo je nuceno udržovat svou stálou teplotu, je nuceno zvyšovat energetický výdej, což se promítá zvyšováním metabolické aktivity [34].

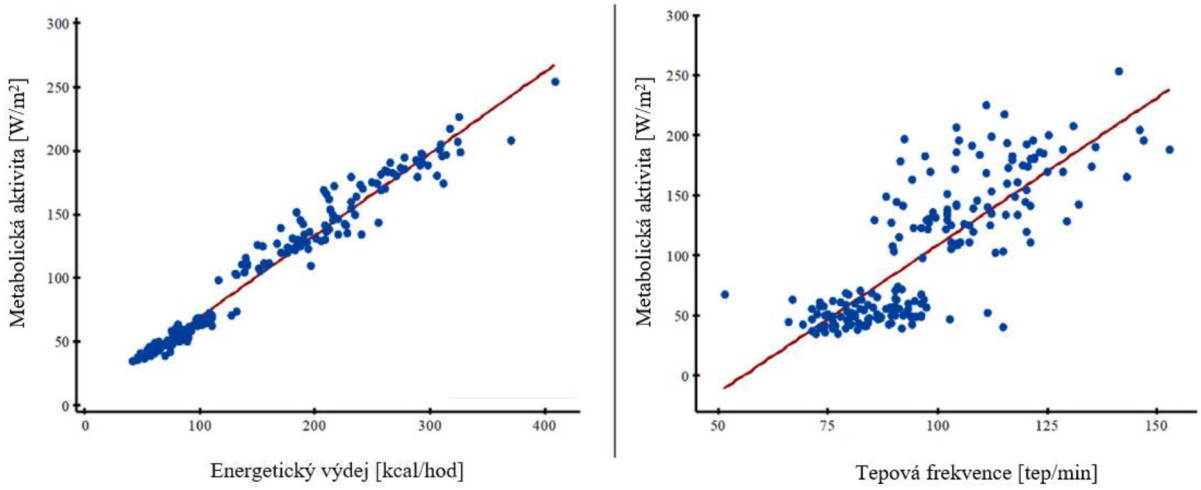



*Obrázek 11 Závislost MR na teplotě okolí pro různé typy oblečení, upraveno z [34]*

Marginální vliv okolní teploty na metabolickou aktivitu je také v souladu s výsledky studie dle AMAND a kol. [25], která zdůrazňuje tuto závislost hlavně pro stacionární aktivity.

## 3.3 Závislost MR na energetickém výdeji a srdeční frekvenci

Níže jsou zobrazeny výsledky ze studie dle AMAND a kol. [25], která se zabývala mimo jiné také závislostmi mezi základními tělesnými vlastnosti a metabolickou aktivitou. Na obrázku 12 je zobrazena závislost metabolické aktivity na energetickém výdeji a také závislost na srdeční frekvenci. Z daného obrázku je patrné, že lze aproximovat závislosti lineární funkcí. Nicméně, pro vyšší energetický výdej, či vyšší tepovou frekvenci dochází k většímu rozptylu naměřených hodnot metabolické aktivity [25].



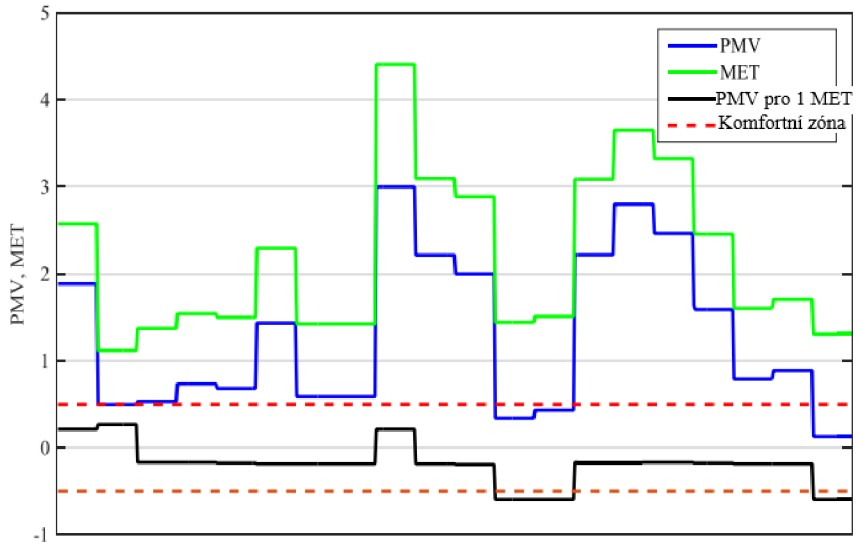

*Obrázek 12 Závislost metabolické aktivity na energetickém výdeji a tepové frekvenci [25]*

## 3.4 Aplikace hodnoty MR v technické praxi

Obecně je výměna tepla lidského těla s okolím velmi komplexní problematikou, kterou se již desítky let zabývají vědci z celého světa. Již jsou vytvořeny matematické modely, které dovedou predikovat teplený stres lidského organismu v závislosti na vnějších podmínkách. Nicméně vstupním parametrem do většiny těchto modelů je přesná hodnota energetického výdeje potažmo metabolické aktivity. Jedná se o parametr, který má jeden z nejvýraznějších vlivů na přesnost predikce tepelného pocitu/komfortu, proto je důvodné se zabývat jejím odhadem podrobněji [1].

V současné době patří k nejobvyklejším způsobům hodnocení tepelného pocitu model dle ukazatele PMV a model pro hodnocení tepelného komfortu dle PPD, které jsou stanoveny v ČSN EN ISO 7730 [35].

Pro ilustraci závislosti tepelného pocitu predikovaného pomocí indexu PMV na metabolické aktivitě [36] je uveden obrázek 13. Zde je zobrazena hodnota metabolické aktivity v čase a jak ovlivňuje index PMV. Šetření bylo provedeno u probanda mužského pohlaví ve věku 22 let. Černou barvou je zobrazen PMV index pro konstantní hodnotu metabolické aktivity 1 MET. Zelenou barvou je označena metabolická aktivita, která byla přesně měřena a modrou upravený PMV index v závislosti na přesné hodnotě metabolické aktivity. Je patrné, že právě přesný odhad metabolické aktivity zaručuje validní odhad tepelného komfortu. Kvalita odhadu pomocí nejnovějších matematických modelů se tedy částečně odvíjí právě od kvality odhadu metabolické aktivity. Metodami měření či odhadu metabolické aktivity se zabývá podrobněji kapitola 4.




*Obrázek 13 Závislost PMV na metabolické aktivitě zobrazeno v čase [36]*

Přehledně jsou uvedeny indexy tepelného pocitu i matematické modely tepelného komfortu v literatuře dle HAVENITH a kol. [37]. Níže je uveden stručný výpis těch základních.

Za zmínku nejprve stojí HSI index tepelného pocitu, který slouží k hodnocení spokojenosti pracovníků z hlediska tepelné zátěže pro danou činnost a dané podmínky. Jde spíše o deklarování limitních hodnot pro rychlost potu, a to jak pro nízké, tak vysoké pracovní tempo. Jde o to, aby

nebyly překročeny tyto limitní hodnoty u pracovníků vykonávajících konkrétní činnost. Model HSI byl později nahrazen indexem PHS, jelikož se HSI neukázal jako příliš přesný [37]. Index PHS dokáže navíc predikovat rektální teplotu stejně jako komplexní model Fialův.

Komplexnějším modelem, který již má za úkol predikovat mimo termofyziologických projevů lidského těla také tepelný komfort, je Fialův model. Slouží k predikci celkového tepelného vjemu organismu člověka, který je simulován pomocí multisegmentového dynamického modelu lidské teploty. Regresní analýza odhalila, že za důležité termofyziologické proměnné, které jsou odpovědné za teplotní vjem, jsou střední teplota kůže, teplota jádra či teplota hlavy. Na základě těchto indikátorů dokáže tento model predikovat, jak se člověk cítí v daných podmínkách, a to při metabolické aktivitě 1 až 10 Met [38].

Posledním termofyziologickým modelem, který je v souvislosti s hodnocením tepelného stresu uveden, je komplexní UTCI index. Tento index vychází z více uzlového Fialova modelu, který je jedním z nejpokročilejších a dokáže předpovídat jak tepelné účinky na celé tělo (hypotermie, hypertermie), tak také účinky místní (ochlazení nohou, obličeje, omrzliny apod.). Index UTCI je založen na intenzitě fyziologických reakcí na prostředí v široké škále počasí a podnebí. Tento model lze využít ve velkém množství aplikací, v oblastech meteorologických služeb, u systémů veřejného zdraví, pro cestovní ruch, rekreaci i pro výzkum změny klimatu a jeho působení na lidského jedince [39].

## 3.5 Externí práce a MR

Jak je zmíněno výše celkový energetický výdej není však všechen přeměněn na tepelnou energii. Část celkového energetického výdeje je vynaložena na konání svalové mechanické práce. Jedná se o velmi malou hodnotu energie v totálním energetickém výdeji. Konkrétně jde o energii vydávanou organismem, při vykonávání užitečné práce, což je v důsledku jakákoliv činnost, při které dochází k zapojení svalstva v gravitačním poli Země. Lze ji výpočtem zahrnout do výpočtu energetické bilance lidského těla dle rovnice *(3.2)* [1].

$$W_{ex} = \frac{0{,}0981 . m_b . v . \gamma}{A_D} \tag{3.2}$$

$W_{ex}$… externí mechanická práce vztažena na jednotku času a plochu lidského těla [W/m$^2$],

$m_b$ … hmotnost lidského těla [kg],

$v$… rychlost pohybu [m/s],

$\gamma$ … sklon terénu [%],

$A_D$ … plocha lidského těla dle Du Boise [9] [m$^2$].

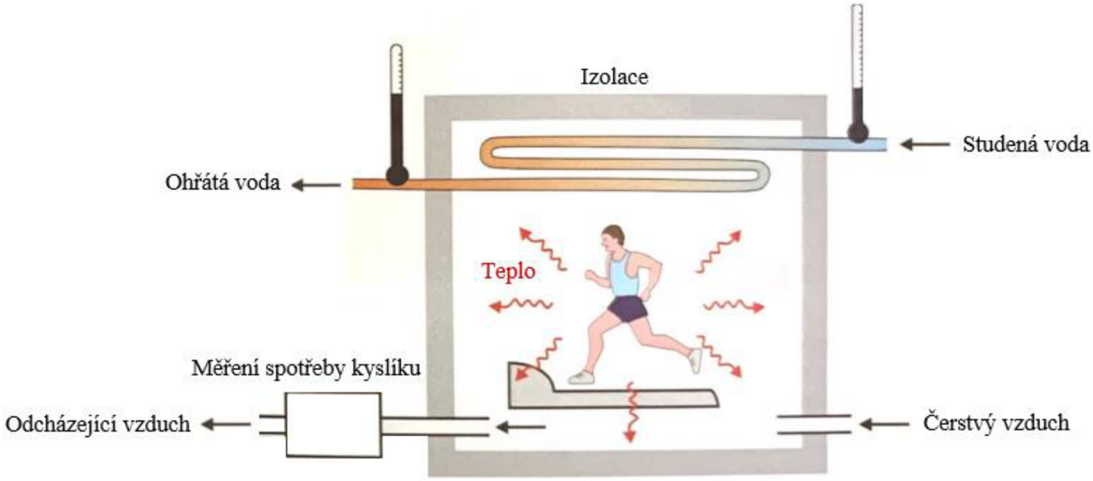
# 4 Metody měření metabolické aktivity

Možnost hodnotit energetický výdej a fyzickou zátěž organismů jednotlivců je v globálním kontextu nesmírně důležitá. Na základě přesného měření lze vyvodit opatření, která zamezí podvýživě, obezitě či cukrovce [40]. Metabolickou aktivitu lze přímo měřit, a to pomocí přímé a nepřímé kalorimetrie.

## 4.1 Přímá kalorimetrie

Energetický metabolismus člověka zahrnuje produkci tepelné energie při spalování paliva ve formě sacharidů, tuků nebo bílkovin. Při tomto procesu dochází ke spotřebě $O_2$ a vzniku $CO_2$ [40]. Měření přímou kalorimetrií zahrnuje měření tepelné energie, kterou člověk uvolňuje do okolí. Toto teplo je přenášeno jako suchá tepelná ztráta (konvekcí, kondukcí, radiací) a také jako evaporace vody.

Samotné měření spočívá v uzavření měřené osoby, která vykonává požadovanou fyzickou aktivitu, do tepelně izolované místnosti, která je zásobena čerstvým vzduchem a současně je protkána soustavou tepelně vodivých trubek, ve kterých proudí teplonosná látka. Z rozdílu teploty látky na vstupu a výstupu, teploty a vlhkosti vzduchu, spotřeby kyslíku, případně výdeje ostatních tělních tekutin se vypočítá celkový energetický výdej [1]. Jedná se o nejpřesnější i nejnákladnější metodu měření energetického výdeje, ilustrace přímé kalorimetrie je zobrazena na obrázku 14.




*Obrázek 14 Schéma přímá kalorimetrie, upraveno z [1]*

## 4.2 Doubly labeled water technique

Techniku dvojitě značené vody lze označit za přesnou a relevantní metodu pro měření metabolické aktivity [30]. Jedná se o metodu tzv. „zlatého standardu“ k hodnocení totálního energetického výdeje. Technika je použitelná pro širokou veřejnost včetně kojících a těhotných žen či kojenců. Výhodou této techniky je, že je neinvazivní a představuje pro účastníky minimální zátěž. Obvykle se posuzuje energetický výdej v horizontu 7-14 dní. Je založena na principu analýzy moči měřených subjektů. Poskytuje přesnou informaci o totálním energetickým výdeji

za sledované období, nelze s ní však měřit energetický výdej pro danou činnost. Nevýhodou je také nutnost zázemí, jelikož analyzovat vzorky je možné pouze v laboratorním prostředí [40].

## 4.3 Nepřímá kalorimetrie

Přesnou metodou pro stanovení energetické výdeje je také využití nepřímé kalorimetrie [1]. Už z názvu je patrné, že se nebude jednat o měření přímo tepelné energie. Nepřímá kalorimetrie je založena na principu měření spotřeby kyslíku, který je nezbytný pro funkci energetického metabolismu, tj. ke spotřebě na spálení cukrů, proteinů za vzniku $CO_2$. Metoda je tedy založena na vztahu spotřeby kyslíku k produkci tepla v lidském organismu [40].

Je více možností, jak analyzovat vydechovaný vzduch. První, tou častější, je užití dýchací masky, kdy buď dochází k exspiraci vydechovaných plynů do předem připraveného vaku, jehož obsah je poté analyzován, nebo do okolního vzduchu přitom analýza probíhá s každým výdechem. Druhou, nákladnou možností, je uzavření testovaného subjektu do místnosti s nuceným větráním, kde je před zahájením činnosti čerstvý vzduch o přesně definovaných parametrech. Pak je vždy v přesně definovaném časovém intervalu odebírán vzduch z místnosti a následně analyzován [26].

Dle normy ČSN EN ISO 8996 [31] lze stanovit energetický výdej nepřímou kalorimetrií pomocí integrální a parciální metody:

V případě lehké a střední práce, kdy je převážně zapojen aerobní metabolismus[14], tedy lidské tělo není v kyslíkovém deficitu vlivem příliš intenzivní práce, lze přistoupit k výpočtu energetického výdeje parciální metodu. Volí se při měření klidových aktivit (sezení, stání) či při činnostech o lehké intenzitě chůze či při pomalém běhu. Je odebírán vzorek po době náběhu, tedy až dojde k ustálení dechu měřeného subjektu při provádění dané činnosti a měří se pouze část, kdy měřený subjekt vykonává danou činnost [31].

Pro těžkou práci a činnosti o vysoké intenzitě, kdy je ve větší míře zapojen anaerobní metabolismus[15], se lidské tělo dostává do kyslíkového deficitu, který kompenzuje po skončení měření. V tomto případě je užití parciální metody nevhodné, jelikož by nedošlo ke změření fáze kompenzace kyslíkového deficitu po měření. Proto je nutné použití metody integrální, kdy měření začíná okamžitě při zahájení dané činnosti, ale pokračuje i několik minut poté, dokud nedojde ke kompenzaci již zmíněného kyslíkového deficitu. Důležité je, že po skončení měření daný subjekt sedí, je tedy nutné ponížit celkový energetický výdej o hodnotu energetického výdeje spojenou s činností sezení [31].

[14] Aerobní metabolismus je typ látkové přeměny, při které lidské tělo vytváří energii odbouráváním sacharidů, aminokyselin a mastných kyselin. Slouží k trvalé produkci energie nejen pro pohyb, ale i pro ostatní tělesné funkce [92].

[15] Anaerobní metabolismus je typ látkové přeměny, při níž tělo vytváří energii vlivem odbourávání sacharidů bez přítomnosti kyslíku. Tento typ metabolismus je zapojen v případě, kdy plíce nedokážou do krevního oběhu dodávat dostatek kyslíku pro pokrytí požadavků svalů na energii. Lidské tělo využívá anaerobního metabolismu pouze pro krátké časové úseky např. při sprintu, či zvedání těžkých břemen. Pokud není v krevním oběhu dostatek kyslíku, glukóza se nemůžu úplně rozložit na $CO_2$ a $H_2O$, jako se tomu děje při aerobním metabolismu. Místo toho dochází k produkci kyseliny mléčné, která se může hromadit ve svalech a způsobovat jejich dočasnou bolest po námaze [92].

Dle normy ČSN EN ISO 8996 [31] lze stanovit produkci metabolismu dle níže uvedených matematických vztahů:

$$MR = EE.\dot{V}_{O_2}\frac{1}{A_D} \tag{4.1}$$

$$EE = (0{,}23.RQ + 0{,}77).5{,}88 \tag{4.2}$$

$$RQ = \frac{\dot{V}_{CO_2}}{\dot{V}_{O_2}} \tag{4.3}$$

*MR* … metabolická aktivita [W/m$^2$],

*EE* … energetický ekvivalent [W.h/litr $O_2$],

RQ … respirační kvocient,

$\dot{V}_{O_2}$… spotřeba kyslíku [l/h],

$\dot{V}_{CO_2}$…produkce oxidu uhličitého [l/h],

$A_D$…povrch těla dle DuBoise [m$^2$].

Pro případ zařízení, které měří průtok vzduchu a podíl kyslíku ve vydechovaném vzduchu je v normě ČSN EN ISO 8996 [31] stanoven následující přepočet.

$$\dot{V}_{O_2} = \dot{V}_{Vex}(0{,}209 - F_{O_2}) \tag{4.4}$$

$$\dot{V}_{CO_2} = \dot{V}_{Vex}(F_{CO_2} - 0{,}0003) \tag{4.5}$$

$$\dot{V}_{Vex} = \frac{V_{ex}STPD}{t} \tag{4.6}$$

$$V_{ex}STPD = V_{ex}ATPS.f \tag{4.7}$$

$$f = \frac{273.(p - p_{H_2O})}{(273 - \theta).101{,}3} \tag{4.8}$$

$\dot{V}_{O_2}$… spotřeba kyslíku [l/h],

$\dot{V}_{Vex}$… průtok vzduchu [l/h], přepočteno na standardní podmínky, tj. teplota okolního vzduchu $\theta = 0$ °C, atmosférický tlak p=101,3 kPa a suchý plyn,

$F_{O_2}$… podíl kyslíku ve vydechovaném vzduchu [-],

$\dot{V}_{CO_2}$… produkce kysličníku uhličitého [l/h],

$F_{CO_2}$… podíl kysličníku uhličitého ve vydechovaném vzduchu [-],

$V_{ex}STPD$… objem vzduchu přepočten na standartní podmínky a suchý stav [m$^3$],

$V_{ex}ATPS$… objem vzduchu za atmosférického tlaku, teploty a vlhkosti [m$^3$],

$f$ … opravný faktor [-],

$p$ … měřený atmosférický tlak [kPa],

$p_{H_2O}$… parciální tlak nasycené vodní páry při teplotě $\theta$ [kPa].

V tabulce 2 níže je uveden tlak nasycené vodní páry pro teploty 10 °C až 37 °C [31]:

*Tabulka 2 Tlak nasycené vodní páry v kPa [31]*

| Teplota [°C] | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **10** | 1,23 | 1,31 | 1,40 | 1,50 | 1,60 | 1,70 | 1,82 | 1,94 | 2,06 | 2,20 |
| **20** | 2,34 | 2,49 | 2,64 | 2,81 | 2,98 | 3,17 | 3,36 | 3,56 | 3,76 | 4,00 |
| **30** | 4,24 | 4,49 | 4,75 | 5,03 | 5,32 | 5,62 | 5,94 | 6,27 | - | - |

Je-li odebraný vydechnutý vzduch ohřátý okolím na teplotu vyšší než 37 °C, pak je použit tlak nasycené vodní páry 6,27 kPa [31].

Dle SLABOTÍNSKÝ a kol. [41] lze stanovit metabolickou aktivitu při měření přístrojem Oxycon (přístroj popsán níže) podle rovnice *(4.9)*.

$$MR = \frac{5{,}88.(0{,}23RQ + 0{,}77).\dot{V}_{O_2}}{A_D} \tag{4.9}$$

$MR$ … metabolická aktivita [W/m$^2$],

$RQ$ … respirační kvocient,

$\dot{V}_{O_2}$… spotřeba kyslíku [l/h],

$A_D$…povrch těla dle DuBoise [m$^2$].

Hodnota respirační koeficientu závisí na oxidovaném substrátu, záleží tedy na složení stravy. U běžného jídla lze uvažovat hodnotu RQ = 0,85 a ve výsledku psát tedy vztah pro výpočet metabolické aktivity dle rovnice *(4.10)* [41].

$$MR = \frac{4{,}72.\dot{V}_{O_2}}{A_D} \tag{4.10}$$

$MR$ … metabolická aktivita [W/m$^2$],

$\dot{V}_{O_2}$… spotřeba kyslíku [l/h],

$A_D$…povrch těla dle DuBoise [m$^2$].

# 5 Zařízení využívající nepřímé kalorimetrie

V praxi se pro přesné měření energetického výdeje nejčastěji využívají zařízení, která jsou založena na principu nepřímé kalorimetrie, tj. na analýze vydechovaných plynů. V tomto okamžiku je potřeba také uvést, že zařízení se dělí na stacionární a nestacionární (přenosné). Hlavním rozdílem je, že stacionární mohou být užity pouze v laboratoři, kdežto nestacionární přístroje (přenosné) lze použít v terénu, díky jejich malým rozměrům. Ve validačních studiích se také často setkáme s metodou měření energetického výdeje využívající tzv. Douglasova vaku, kdy je exspirovaný plyn shromažďován ve výše zmíněném vaku a dále analyzován, viz obrázek 15 [42].

*Obrázek 15 Měření při využití Douglasova vaku, převzato z [42]*

Medicínských zařízení, která fungují na principu nepřímé kalorimetrie, je velká spousta, pro představu jsou uvedena a stručně popsána ta nejvíce rozšířená, mezi ně patří zařízení od firem Omnical, Cosmed a Vyaire Medical.

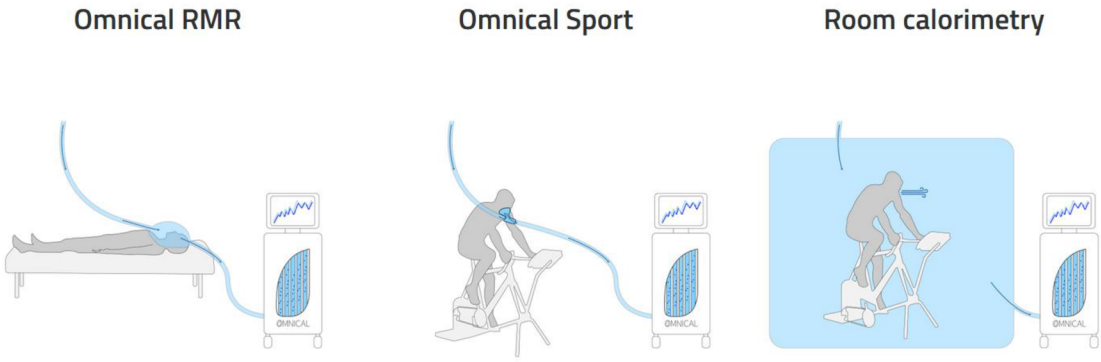
## 5.1 Omnical

Medicínské přístroje Omnical dodává na trh soukromá společnost s ručením omezeným Maastricht Instruments BV, která pochází z inženýrského oddělení Fakulty zdravotnictví, lékařství a přírodních věd Lékařského centra Maastrichtské univerzity. Společnost byla založena v roce 1998 a sídlí ve specializovaných high-tech prostorech, ve kterých vyvíjí přesné medicínské přístroje pro aplikaci nejen ve zdravotnictví. Dnes se jedná o společnost, která poskytuje zákazníkům z celého světa nová zařízení a příslušenství pro nepřímou kalorimetrii [43].

Společnost má v nabídce tato zařízení [43], přičemž všechna pracují na principu nepřímé kalorimetrie:

- Omnical RMR – je využívaná tzv. ventilační kapuce.
- Omnical Sport – jedná se o zařízení, kdy je nutná obličejová dýchací maska.
- Room calorimetry – je zařízení, které může využívat celopokojové kalorimetrie i analýzy přímo vydechovaného vzduchu bez použití obličejové masky. Výhodou je, že při činnostech, u kterých nelze dýchací obličejovou masku komfortně nasadit je možné měřit i celoprostorově.

Pro lepší přehlednost v klasifikaci je níže uveden obrázek 16 [43]:




*Obrázek 16 Ilustrace zařízení Omnical, zdroj [43]*

Systémy Omnical měří celkový průtok vzduchu a určují koncentrace plynů vdechovaného a vydechovaného plynu. Vzorky jsou v případě měření Omnical odebírány každé dvě minuty. Součástí jsou dva analyzátory, kdy jeden měří spojité koncentrace exspirovaného plynu a druhý vždy ve výše definovaném intervalu. Toto technické řešení je voleno z důvodu normalizace výsledků. Při spojitém měření dochází k vyhodnocení 50 vzorků za sekundu [26].

Validací zařízení Omnical se zabývaly studie dle SCHOFFELEN a kol. [26], KAVIANI a kol. [44] a ALCÁNTARA a spol [45].

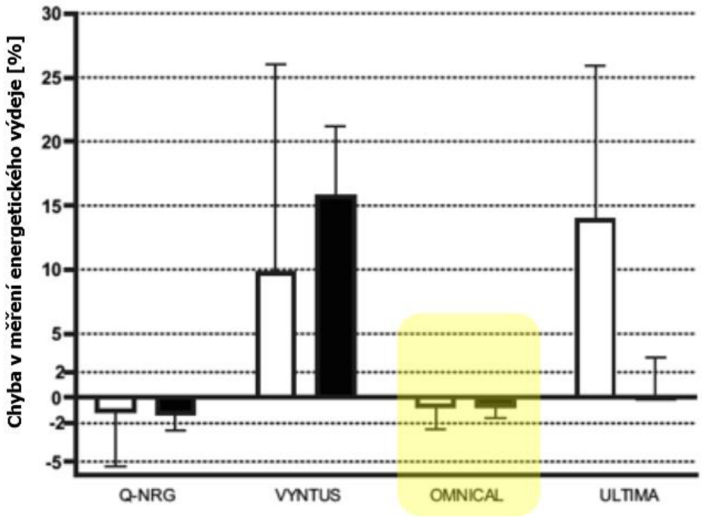
Studie dle SCHOFFELEN a kol. [26] se zabývala analýzou přesnosti měřené hodnoty $VO_{2max}$ u lidských subjektů pomocí nepřímé kalorimetrie. Testování se účastnilo 27 mužů, ve věku 27 ± 5 let. Byly provedeny dva CPET[16] testy na cyklovém ergometru s odstupem 7 ± 2 dnů. Hodnoty spotřeby kyslíku a exspirace oxidu uhličitého byly ve dvou testech měřeny pomocí zařízení Omnical a ve třetím zařízením Oxycon Pro. Závěrem studie je, že hodnotu $VO_{2max}$ přesněji měří zařízení Omnical, jelikož při měření zařízením Oxycon Pro docházelo k podhodnocení. Ze studie také vyplývá, že totální záchytná kalorimetrie[17] s volným průtokem je vhodná pro měření spotřeby kyslíku i u aktivit o vysoké intenzitě.

V disertační práci, na které spolupracovali ALCÁNTARA a MANUEL [45], jsou uvedeny závěry v porovnání 4 metabolických vozíků (Omnical, Q-NRQ, Vyntus CPX, Ultima). Přístroj Omnical vykazoval nejpřesnější výsledky v měření exspirovaných plynů. Etalonem tohoto měření byly přesně spočtené hodnoty z chemických rovnic při spalování metanolu (analýza 1) a pomocí plynových infuzí (black bars), (analýza 2). Biologická reprodukovatelnost[18] Q-NGR a Vyntus CPX byla podobná té, kterou dosáhl Omnical. Ze studie vyplývá, že zařízení Omnical je nejpřesnější z výše uvedených analyzovaných metabolických vozíků pro měření RMR. Práce

[16] CPET – cardiopulmonary exercise test – jedná se o způsob, kdy je testována schopnost pohybu v závislosti na fyzické zdatnosti, jedná se o medicínský test.
[17] V této souvislosti totální záchytná kalorimetrie označuje metodu sběru exspirovaných plynů a jejich následné analýzy. Metodami sběru exspirovaných plynů se blíže zabývá ve své studii ALCANTARA a kol. [94].
[18] Biologická reprodukovatelnost v tomto kontextu znamená, že přesnost měřících zařízení byla dostatečně velká na to, aby zařízení Q-NGR a Vyntus CPX dokázala spolehlivě analyzovat množství exspirovaných plynů na úrovni dýchání člověka.

také naznačuje, že biologická reprodukovatelnost je z větší části přisuzována individuálním vlastnostem, nikoliv postkalorimetrickému postupu, který se skládá z infúze čistých plynů po individuálním měření [45].

Níže na obrázku 17 je zobrazeno porovnání 4 výše zmiňovaných metabolických vozíků pro měření energetického výdeje. Z obrázku 17 je patrné, že zařízení Omnical vykazuje nejmenší odchylky procentuální chyby v měření energetického výdeje. Měření tímto přístrojem bylo také velmi konzistentní, jelikož má nejmenší chybové intervaly. Na obrázku 17 jsou zobrazeny pro každý přístroj vždy dva sloupce rozdílné barvy v závislosti na typu analýzy (analýza 1 a 2) přesnosti měřené hodnoty energetického výdeje. Bílou barvou je zobrazeno porovnání při spalování methanolu a černou barvou při užití infuze plynu s přesně definovaným složením [45].



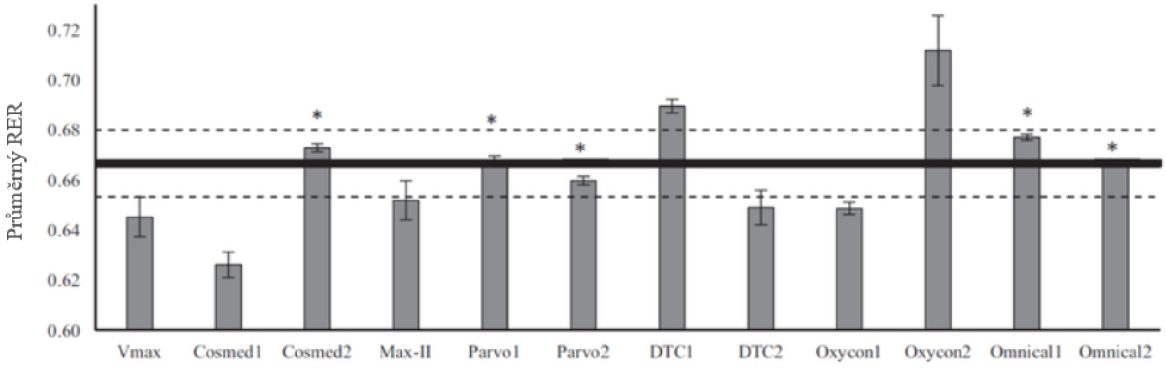

*Obrázek 17 Procentuální chyba energetického výdeje v porovnání pro jednotlivé měřiče, upraveno z [45]*

Studie dle KAVIANI a kol. [44] se zabývala validací 12 přesných metabolických vozíků (Omnical, Cosmed, Parvos oba typy, DeltaTracs, Vmax, Oxycon, Max II), přičemž porovnávací metodou byla laboratorní zkouška založená na spalování metanolu[19]. Přístroje byly zkoušeny v osmi 20minutových zkouškách, kdy byl spalován již výše zmíněný metanol. Byl vypočten respirační poměr RER, a ten následně vyhodnocen.

RER[20] (respirační poměr) je důležitým porovnávacím kritériem, pomocí kterého lze komparovat zařízení, která měří metabolickou aktivitu a jsou založena na nepřímé kalorimetrii. Jedná se o poměr mezi vydechnutým $CO_2$ a přijatým $O_2$. Tento poměr je zobrazen na obrázku 18, pro 12 metabolických vozíků. Opět velmi dobrých výsledků dosahovaly přístroje Pravo a Omnical. Nicméně přístroje Oxycon při vyhodnocení RER dosahovaly podobných výsledků jako ostatní metabolické vozíky. Nejhůře měřilo respirační poměr zařízení Cosmed 1 [44].

[19] Při metodě spalování metanolu se využívá chemického základu, kdy je přesně známá závislost hmotnosti metanolu a vzniklého oxidu uhličitého. Přístroje pak musí tuto hodnotu oxidu uhličitého změřit. Je porovnáváno odchýlení přístroje od přesné, vypočtené hodnoty [44].
[20] RER = respirační poměr, je to poměr mezi vydýchaným $CO_2$ a přijatým $O_2$.

Z výsledků výše uvedených studií lze posuzovat, že stacionární měřiče dosahují mírně přesnějšího měření exspirovaných plynů než přístroje mobilní, avšak i ty dosahují velmi dobrých výsledků.




*Obrázek 18 Průměrný RER, upraveno z [44]*

## 5.2 Cosmed

Cosmed je italská společnost, která byla založena v roce 1980. Vyrábí a celosvětově prodává zdravotnická diagnostická zařízení pro hodnocení kardiopulmonálních a metabolických funkcí. Systémy, které značka vyrábí, jsou velmi často skloňovány ve vědeckých studiích pro hodnocení energetického výdeje [46].

Technologie vyvinuté značkou Cosmed jsou založeny na kardiopulmonálním hodnocení[21], bilancování metabolismu, složení těla a na pletysmografii[22] výtlaku vzduchu. Firma Cosmed nabízí níže uvedené přístroje pro měření pomocí nepřímé kalorimetrie [46]:

- Metabolický monitor Q-NRG a QNRG+ - jedná se o systémy, které jsou využívány spíše při klinických aplikacích.
- Metabolický vozík RMR – jedná se o zařízení, které měření klidový energetický výdej neinvazivním způsobem prostřednictvím spotřeby kyslíku a produkce oxidu uhličitého spolu s dalšími ventilačními parametry.
- Metabolický stolní systém Fitmate WM – jedná se o kompletní desktopové zařízení pro přesné a rychlé měření využívající nepřímé kalorimetrie.
- Cosmed K5 – jedná se o nejnovější řadu přenosných měřičů od firmy Cosmed.

### 5.2.1 Cosmed K5

Jedná se o čtvrtou generaci nositelných zařízení využívajících nepřímou kalorimetrii. Přenosný systém byl validován dle studií CROUTER a kol. [47], WHITE a kol. [48], PEREZ-SUAREZ a spol. [49]. Pro bližší představu je níže na obrázku 19 zobrazeno přenosné zařízení Cosmed K5.

[21] Kardiopulmonární hodnocení je obecně hodnocení stavu srdeční soustavy, tj. srdečního tlaku, tepu, průchodnosti cév apod [46].
[22] Jedná se o vyšetřovací metodu, která hodnotí prokrvení tkání a reaktivitu cév [103].

*Obrázek 19 Přenosné zařízení Cosmed K5 [46]*

Účelem studie dle COUTER a kol. [47] bylo posoudit přesnost přenosného metabolického systému Cosmed K5 pro režim dynamické směšovací komory dech po dechu[23] proti kritériu metody Douglasova vaku. Měření se účastnilo 15 účastníků v průměrném věku 30,6 ± 7,4 let. Přičemž samotné testování se skládalo z měření energetického výdeje v klidu a při cyklování na sportovním rotopedu s regulovaným odporem 50, 100, 150, 200 a 250 W. Výsledkem studie bylo, že zařízení Cosmed K5 mírně podhodnocovalo produkci oxidu uhličitého při cyklování o odporu 150 W, nicméně závěrem studie je skutečnost, že oba přístupy měření poskytovaly vzájemně srovnatelné hodnoty [47].

Studie dle WHITE a kol. [48] se zaměřila na validaci zařízení při chůzi rychlostí 1,5 – 4mph[24]. Testování se účastnilo 27 dospělých subjektů (14 žen) ve věku 27 ± 5 let s procentuálním podílem tuku 21,0 ± 8,2 %. Měření bylo provedeno pro rychlosti ve výše uvedeném rozpětí vždy s konstantním krokem 0,5 mph a po sedmi dnech došlo k jeho opakování. Závěr studie je, že zařízení Cosmed K5 poskytovalo spolehlivá měření $VO_2$, $VCO_2$, METs a EE při různých rychlostech chůze, přičemž nejvyšší spolehlivost vykazovalo při rychlostech 3–4 mph [48].

Ve studii dle PEREZ-SUAREZ a spol. [49] je ověřována přesnost měření zařízení Cosmed K5 v porovnání se stacionárním měřičem Vyntus CPX. Cílem bylo ověřit měření v terénních podmínkách. V této studii jsou shrnuty poznatky ze dvou měření, a to jak v klidu, tak při cvičení. Spolehlivost zařízení Cosmed K5 byla hodnocena při delších procházkách (13 km). Závěrem studie je, že Cosmed K5 vykazuje přesnost měření srovnatelnou se stacionárním metabolickým vozíkem, a to i pro měření přesahující dvě hodiny práce [49].

---

[23] Pro sběr vydechovaných plynů se využívá více metod, viz studie dle ALCANTARA a kol. [94]. Hlavním rozdílem mezi metodu Douglasova vaku a metodou dech po dechu je, že při první metodě jsou vydechované plyny sdružovány do vaku a poté analyzovány, přičemž nejsou nikterak ředěny. U metody dech po dechu dochází k diskrétní analýze každého dechu.

[24] mph – mile per hour (míle za hodinu)

Studie dle DUFFIELD a kol. [50] se zabývala testováním přesnosti odhadu přenosného metabolického vozíku (Cosmed K4) při různých fázích běhů. Tato studie je zde uvedena spíše z důvodu popisu průběhu měření. Důležité je zmínit, že hodinu před zahájením testu byl přístroj kalibrován a zahříván. Samotné měření se skládalo z 5minutového běhu volným tempem (zahřátí), 2minutového běhu rychlostí 8 km/h, 3minutového běhu 10 km/h a sprintu, který trval 1 minutu. Takovéto intervaly byly voleny, jelikož systém Cosmed dokáže zaznamenávat data každých 15 s [50].

Studie dle BIGARD a kol. [51] se zabývala ověřováním přesnosti přenosného metabolického vozíku (COSMED K2), nicméně za zmínku stojí spíše průběh a metodika celého testování. Měření se zúčastnilo pouze 7 dobrovolníků mužského pohlaví ve věku 31,2 ± 7,1 roku, s tělesnou váhou 69,8 ± 7,3 kg a výškou 175,5 ± 4,8 cm. Subjekty uvedly, že žijí aktivním životním stylem, tj. že mají průměrně 3–4krát týdně fyzickou aktivitu. Měření bylo uskutečněno na rotopedu, kdy každý subjekt byl měřen 2krát v rozmezí 3 až 7 dnů. Nejprve bylo uvažováno zahřátí 10 min na nejnižší hodnotu mechanického odporu rotopedu a poté byl každé 2 min zvyšován mechanicky odpor o 25 W, přičemž tato fáze trvala 15 min. Celková délka měření tedy i s fází rozehřátí byla stanovena na 25 min [51].

## 5.3 Vyaire Medical

Jedná se o společnost globálního významu, která sídlí na předměstí Chicaga, ale má velké množství odštěpených závodů. Společnost se zabývá respirometrií a podporou dýchání ve všech fázích lidského života. Odběratelé jsou většinou lékařské a medicínské koncerny, nicméně Vyaire Medical Inc. vyvíjí také analyzátory plynů, které lze použít ve spojení s měřením energetického výdeje potažmo metabolické aktivity pro sportovní či technické účely [52].

Příběh Vyaire [52] se začal psát v 50. letech 20. století na dvou různých kontinentech díky neúnavnému úsilí a obětavosti dvou průkopnických lékařských inovátorů. V USA Forrest Bird vynalezl a zdokonalil mechanický ventilátor. Téměř současně v Německu vyvinul Erich Jaeger první kompletní laboratoř pro testování a diagnostiku plicních funkcí.

V průběhu let, prostřednictvím inovací produktů, fúzí a akvizic, se nabídka společnosti rozrostla o produkty a služby od známých a respektovaných zdravotnických značek, které zahrnují AirLife, Vital Signs, Vyntus, Bear Medical Systems, JAEGER, Pulmonetic Systems., Bird Corporation, SensorMedics, Viasys a další.

V současné době došlo ke sjednocení právě pod název Vyaire Medical Inc. Jedná se tedy o společnost, která vyrábí a prodává více než 27 000 produktů pro diagnostiku, léčbu a monitorování respiračních stavů. V současné době vyrábí společnost zařízení Vyntus CPX, což je metabolický vozík, který využívá nepřímé kalorimetrie k odhadu energetického výdeje.

Další zařízení, která jsou spojena s měřením metabolické aktivity na základě nepřímé kalorimetrie, jsou:

- Oxycon Pro
- Oxycon Mobile

### 5.3.1 Oxycon Mobile

Jedná se o telemetrický přenosný spirometrický systém, který zaznamenává data dech po dechu metodou založenou na principu otevřeného systému. Přenosný lehký spirometrický systém se umisťuje na tělo měřeného subjektu pomocí vesty a popruhů, čímž je zajištěno pevné ale zároveň pohodlné provádění měřených aktivit. Přístroj byl vyvinut za účelem využití v terénním prostředí, nicméně je možné ho snadno použít i v prostředí laboratorním. Přístroj Oxycon Mobile je vyobrazen na obrázku 20 [53].

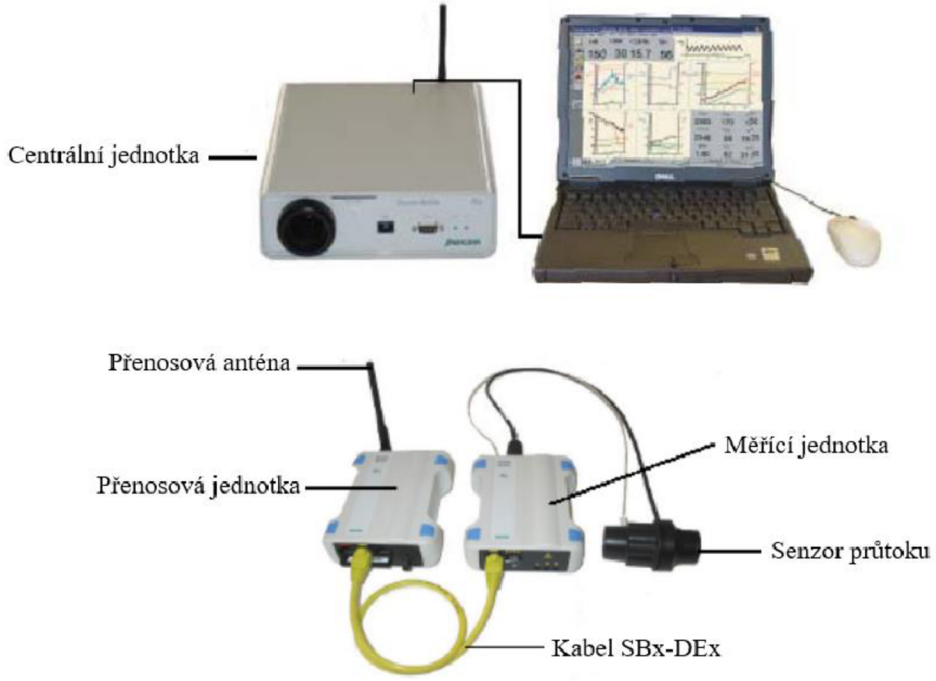
*Obrázek 20 Oxycon Mobile [53]*

Níže je uveden základní popis hardware přístroje Oxycon Mobile [53]:

Základní jednotkou jsou dva kompaktní moduly SBX a DEX, které jsou umístěny na hrudníku nebo na zádech testovaného, viz obrázek 20. Podrobné vyobrazení jednotlivých komponent přístroje včetně popisu je znázorněno na obrázku 21.

- Sensorbox (SBX): obsahuje elektrochemický kyslíkový analyzátor s rychlou odezvou (odezva 80 ms po digitálním filtrování) a velmi rychlý analyzátor kysličníku uhličitého (odezva menší než 80 ms).
- Jednotka výměny dat (DEX): jednotka zaznamenává data ze Sensorboxu (ventilace, $O_2$, $CO_2$ a případně srdeční frekvenci) a ty posílá telemetricky (dosah 1000 m) k základní stanici připojené k počítači.
- Měření objemu je provedeno přes lehký a přesný obousměrný digitální snímač objemu (DVT), který může být umístěn přímo v ústech; je nezávislý na vlhkosti. Mrtvý prostor snímače je 30 ml.
- Měření srdeční frekvence provádí integrovaný přijímač srdeční frekvence Polar® uložený v opasku vesty (v našem případě nebyl použit).
- Sluchátko: umožňuje přijímat věcné informace vysílané ze základní stanice nebo dává informace o výkonu systému.
- Tlačítko událost: umožňuje označit události během terénního testu pro pozdější vyhodnocení.
- Jednotka výměny dat DEX je navíc vybavena integrovanou paměťovou kartou (32 MB), kam se provádí simultánní ukládání měřených dat současně s telemetrickým přenosem. DEX také obsahuje napájení přenosného systému – lithiové dobíjecí baterie.
- Základní stanice – jednotka PCa: je připojena k desktopu nebo notebooku přes USB-port a obsahuje telemetrickou přijímací/vysílací jednotku. Stanice také obsahuje plně integrovaný automatický kalibrační systém analyzátorů a systém pro kalibraci průtoku.
- Nabíječka baterií: umožňuje současně nabíjet dvě akumulátorové baterie.

- Přepravní box: obsahuje všechny jednotky a základní části Oxycon Mobile pro pohodlnou a lehkou přepravu pro měření v terénu.




*Obrázek 21 Přístroj Oxycon Mobile, upraveno z [53]*

Oxycon Mobile byl také validován velkým množstvím vědeckých studií. Nejprve je uvedena studie dle ROSDAHL a spol. [2] ve které byl Oxycon Mobile porovnáván s metodou využívající Douglasova vaku. Bylo použito ergometrického kola s regulovatelným odporem 25 W, 50 W, 100 W a 150 W, přičemž kadence byla stanovena na 50 ot/min. Tato studie [2] potvrzuje, že metabolické proměnné v širokém rozsahu intenzit jsou spolehlivě měřitelné při užití zařízení Oxycon Mobile.

Ve validační studii dle SCHOFFELEN a kol. [54] vystupovala zařízení Omnical a Oxycon Pro (stacionární verze). Studie se spíše zabývala medicínským tématem určení zátěžové kapacity u pacientů, nicméně tato studie poukazuje na možnost využití nepřímé kalorimetrii pro určení hodnoty $VO_{2max}$, a to jak u netrénovaných, tak trénovaných jedinců pomocí těchto přístrojů.

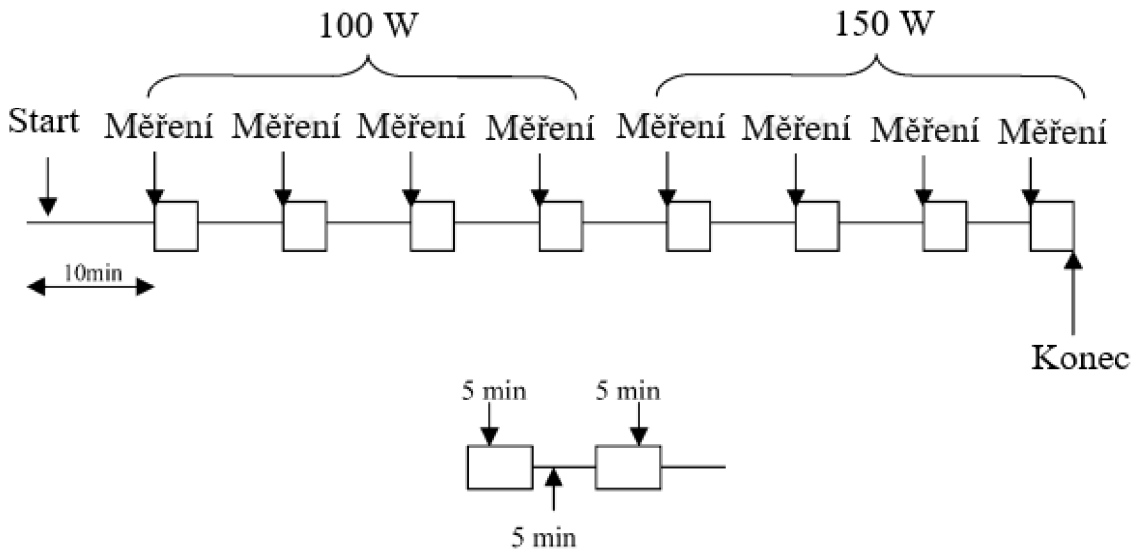
Ve validační studii dle AKKERMANS a kol. [55] se zabývali přesností měřené hodnoty spotřeby kyslíku a exspirovaného oxidu uhličitého při využití zařízení Oxycon Mobile, a zda je možné tento přístroj využít pro aktivity o vyšší intenzitě. Měření bylo realizováno na stacionárním ergometru, přičemž studie se zúčastnilo 22 dospělých subjektů mužského a ženského pohlaví. Výsledky studie také potvrzují tvrzení, že je možné Oxycon Mobile využít pro determinaci hodnoty spotřeby kyslíku i exspirovaného oxidu uhličitého a také, že měří dostatečně přesně objem vydechovaného vzduchu.

Poslední studii, která je uvedena k tématu validace přenosného zařízení Oxycon Mobile, je studie dle ERIKSSON a kol. [56], která se zabývala užitím systému Oxycon Mobile v terénních podmínkách. Srovnávací měření bylo stanoveno dle metody Douglasova vaku. Měření bylo

uskutečněno na ergometru s redukovatelným mechanickým odporem (75, 150 a 200 W) při kadenci 50 ot/min. Tato studie potvrzuje možnost využití Oxycon Mobile v terénních podmínkách, přičemž zajímavým zjištěním studie je skutečnost, že externí vítr z přední a boční strany nemá žádný vliv na měření spotřeby kyslíku. Minoritní vliv má pouze, pokud vítr fouká měřenému subjektu do zad [56].

## 5.4 Další studie validující přístroje využívající nepřímou kalorimetrii se zaměřením na návrh měření

Studie dle CARTER a spol. [57] se zabývala ověřením přesnosti tří komerčně dostupných metabolických vozíků (Oxycon Pro, Oxycon Alpha a Pulmolab EX670), využívajících analýzu dech po dechu, oproti přesnému měření pomocí Douglasova vaku. Tohoto měření se zúčastnilo 10 zdravých mužských subjektů ve věku 23 ± 3 roky s tělesnou hmotností 71,8 ± 9 kg. Měřicí protokol je zobrazen na obrázku 22. Důležité je, že opět je před zahájením měření zavedena zahřívací 10minutová fáze, přičemž samotné měření jedním přístrojem trvalo 5 min, celé měření trvalo 85 min vždy 5 min měření a 5 min neměřená fáze, během které došlo k přepojení přístroje. Měření bylo provedeno na cyklometru s regulovatelným odporem pro dvě varianty zátěže 100 W a 150 W [57].




*Obrázek 22 Průběh měření, upraveno z [57]*

Studie dle CROUTER a kol. [58] je zaměřena na deklaraci spolehlivosti a přesnosti dvou metabolických systémů (ParvoMedics TrueOne 2400 a MedGraphic VO 2000). Měření se účastnilo 10 probandů mužského pohlaví ve věku 20 ± 1,7 roku, s výškou 179,3 ± 11,6 cm, tělesnou hmotností 78,2 ± 12,7 a BMI[25] 24,2 ± 2,0. Všechny měřené subjekty byly testovány dvakrát během 48 hodin, přičemž jejich test sestával ze šlapání na elektrickém ergometru s regulovatelným odporem 50 W, 100 W, 150 W, 200 W a 250 W. Měření probíhalo vždy v pětiminutových etapách, přičemž byl stanoven šestiminutový odpočinek mezi cvičeními se zátěžemi

[25] BMI = Body Mass Index (Index tělesné hmotnosti)

150 W a 200 W. K analýze přesnosti přístrojů byly pak použity vždy poslední dvě minuty z každé etapy [58].

Komplexní validační studii vytvořil ANAND a kol. [25], který se zabývá odhadem rychlosti metabolismu a fyziologickou odpovědí organismu prostřednictvím experimentů s řízenou klimatickou komorou. Studie se zúčastnilo 48 dobrovolníků, kteří byli kategorizováni dle pohlaví, věku a indexu BMI. Celkem se tedy výzkumu zúčastnilo 24 žen a 24 mužů, ve věku 27 ± 9 let, s BMI 22 ± 3. Měřené subjekty se účastnily 5 měření, přičemž měřené činnosti byly sezení, stání, chůze rychlostí 2 km/h a rychlostí 4 km/h. Při měření byl využit přenosný metabolický vozík Cosmed K5. Detailní měřicí protokol je uveden na obrázku 23. Podmínky měření byly 26 °C, relativní vlhkost 40 % a rychlost okolního větru 0,5 m/s.

*Obrázek 23 Podrobný měřicí protokol, včetně řazení jednotlivých činností, dle ANAND, upraveno z [25]*

## 5.5 Shrnutí a naznačení budoucích trendů

V prosinci 2021 byl vydán rozsáhlý porovnávací článek [59], který hodnotil možnosti aplikace a přesnost přenosných metabolických zařízení. Tento článek shrnuje výsledky z velkého množství studií a naznačuje také možnosti směru dalšího výzkumu v oblasti přesných přenosných metabolických vozíků, využívajících pro měření energetického výdeje nepřímou kalorimetrii. Výsledkem je skutečnost, že obecně platí, že se zvyšující se intenzitou cvičení roste variabilita mezi naměřenými hodnotami metabolické zátěže. Studie také uvádějí obecně velkou spolehlivost přenosných metabolických zařízení při opakování testů [59]. Přesnost vykládaných naměřených hodnot by však měla být interpretována opatrně při činnostech o vyšší intenzitě [59].

Budoucí výzkum by se tak měl zaměřit na spolehlivost zařízení při činnostech o vysoké intenzitě a možnost jejich využití v týmových sportech. Přenosné metabolické systémy jsou také

vhodné k detekci CRF[26] v reálném čase, což má velký potenciál právě např. ve vrcholovém sportu [59].

[26] CRF = kardiorespirační zdatnost, často vyjádřená jako maximální aerobní kapacita ($VO_{2max}$)

# 6 Metody odhadu metabolické aktivity

Pro aplikaci v technické praxi je možné metabolickou aktivitu odhadovat na základě tabelovaných hodnot pro jednotlivé fyzické aktivity např. dle ČSN EN ISO 8996 [31]. Nicméně, tento tabelovaný odhad má spíše informativní charakter, jelikož vychází převážně z dlouhodobých zkušeností, ale není založen na měření tělesných funkcí v průběhu vykonávané činnosti. Dalším zdrojem, ze kterého lze čerpat při odhadu metabolické aktivity je Kompendiu fyzických aktivit [60]. Jedná se o rozsáhlý zdroj, ve kterém je uvedena hodnota metabolické aktivity pro velké množství činností, přičemž většina hodnot metabolické aktivity je validována studiemi z celého světa [60].

Dále existují metody, které již odhadují energetický výdej z měřených veličin v průběhu dané činnosti. Mezi jednodušší patří například ty, které dovedou odhadovat energetický výdej na základě počtu kroků, mezi složitější ty, které predikují energetickou zátěž na základě více parametrů např. dynamiky pohybu či srdeční frekvence.

## 6.1 Odhad metabolické aktivity ze srdeční frekvence

Zvýšení srdeční frekvence je jedním z prediktorů fyzické zátěže lidského těla. Pokud se lidské tělo pohybuje, dochází ke zvýšení potřeby kyslíku pro svalstvo, tedy je nutné zvýšit průtok krve do exponovaných svalů. Nicméně při zvýšené fyzické zátěži dochází také ke zvýšení dechové frekvence, proto je důležité zkoumat vztah HR[27] a $VO_2$, který má podstatný vliv na celkový energetický výdej potažmo metabolickou aktivitu [61].

Linearitu závislosti srdeční frekvence na spotřebě kyslíku pro činnosti, při kterých je zapojen převážně aerobní metabolismus, potvrdil ACHTEN a kol. [61], který se ve svých studiích blíže zabýval zkoumáním srdeční frekvence. Ve své studii také popisuje, že vztah mezi srdeční frekvencí a spotřebou kyslíku může být ovlivněn mnoha faktory. Například dehydratace či změna okolní teploty mohou mít významný vliv na linearitu závislosti HR a $VO_2$.

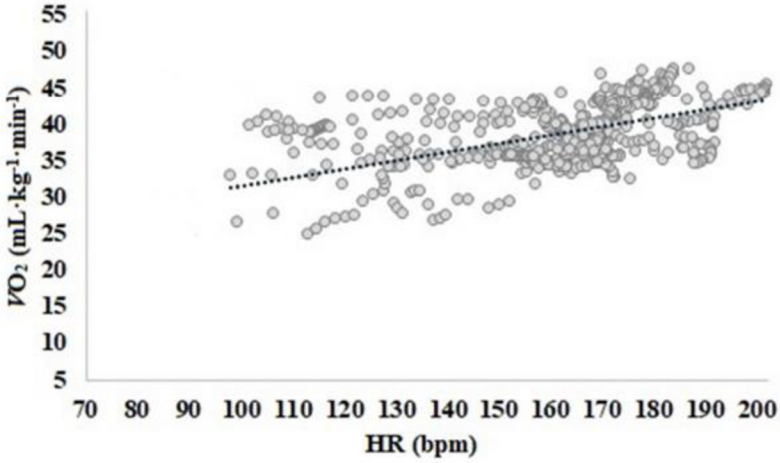
Při velmi pohybově náročných aktivitách, jako např. při kolektivních sportech, kde dochází k prudkému zrychlování a zpomalování, dochází velmi často k zapojení anaerobní složky metabolismu. Dochází tak ke změnám krevního laktátu, což je při odhadu energetického výdeje ze srdeční frekvence jen velmi těžce postihnutelné [62].

Ve studii dle SILVA a kol. [62], která se mimo jiné zabývala odhadem celkového energetického výdeje při futsalu (aktivitě u které je zapojen anaerobní metabolismus), byla stanovena lineární závislost mezi srdeční frekvencí a spotřebou kyslíku i pro tuto aktivitu, viz obrázek 24. Pro porovnání je uveden obrázek 25, na kterém lze vidět lineární závislost srdeční frekvence na spotřebě kyslíku při běhu na běžícím pásu s kontinuálním zvyšováním rychlosti pohybu.

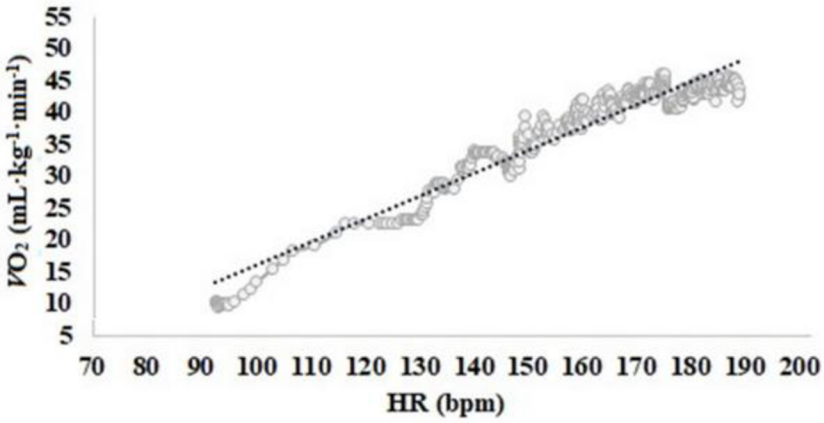
U obrázku 24 a i 25 lze pozorovat lineární závislost spotřeby kyslíku na srdeční frekvenci. Dle této studie lze použít pro činnost o vyšší intenzitě při které je zapojen anaerobní metabolismus lineární závislost pouze však na úrovni vybrané skupiny, a není tedy tato závislost zajištěna v širší populaci. Při bližší analýze lze pozorovat mnohonásobně vyšší rozptyl, viz obrázek 24, pro aktivity o nepravidelné vysoké intenzitě (futsalu), než u aktivit o vysoké intenzitě s kontinuálním navyšováním zátěže (běhu), viz obrázek 25. Z tohoto důvodu je nutné brát odhad

[27] HR = Heart rate (srdeční frekvence)

metabolické aktivity pro činnosti, u kterých je ve větší míře generován krevní laktát s rezervou i na individuální úrovni tedy pro jednotlivce [62].




*Obrázek 24 Závislost spotřeby kyslíku na zvyšující se srdeční frekvenci pro futsal [62]*




*Obrázek 25 Závislost spotřeby kyslíku na srdeční frekvenci pro běh na běžícím pásu s kontinuálním zvyšováním rychlosti [62]*

Srdeční frekvenci ovlivňuje velké množství faktorů, mimo fyziologické (genetika, kondice apod.) také psychická zátěž. Stres je jedním z parametrů, který se výrazně projevuje s nárůstem srdeční frekvence, a to jak pozitivní, tak i negativní. Proto bylo přistoupeno k tzv. očišťování srdeční frekvence tedy korekci o její stresovou složku, která je měřitelná a negativně se propisuje do výsledků měření v podobě nadhodnocení výsledné přepočítané metabolické aktivity [63].

Srdeční frekvenci lze dle ČSN ISO 8996 [31] rozepsat do vztahu uvedeného níže

$$HR = HR_0 + \Delta HR_M + \Delta HR_S + \Delta HR_T + \Delta HR_N + \Delta HR_E \tag{6.1}$$

$HR$…celková srdeční frekvence [tep/min],

$HR_0$…srdeční frekvence v klidu, v nakloněné poloze, za neutrálních tepelných podmínek [tep/min],

$\Delta HR_M$…zvýšení srdeční frekvence z důvodu dynamického zatížení svalů, za neutrálních tepelných podmínek [tep/min],

$\Delta HR_S$…zvýšení srdeční frekvence z důvodu statické svalové práce [tep/min],

$\Delta HR_T$…zvýšení srdeční frekvence z důvodu tepelného stresu (tepelná složka, kterou blíže popisuje ČSN ISO 9886 [29] [tep/min],

$\Delta HR_N$…zvýšení srdeční frekvence z důvodu mentálního zatížení [tep/min],

$\Delta HR_E$… změna srdeční frekvence z důvodu jiných faktorů, např. dehydratace [tep/min].

Norma ČSN ISO 9886 [29] se mimo jiné zabývá tepelnou složkou srdeční frekvence. Tuto složku je možné stanovit dle níže uvedeného vztahu, přičemž je zanedbána změna srdeční frekvence vlivem statického i dynamického zatěžování, mentálního zatěžování i ostatních vlivů:

$$\Delta HR_T = HR_{Měřená} - HR_0 \tag{6.2}$$

$HR_{Měřená}$…měřená srdeční frekvence [tep/min],

$HR_0$…srdeční frekvence v klidu, v nakloněné poloze, za neutrálních tepelných podmínek [tep/min].

Při stanovení tepelné složky srdeční frekvence (navýšení vlivem tepelného stresu) touto metodou je tedy nutné nejprve změřit klidovou tepovou frekvenci v neutrálních tepelných podmínkách, poté exponovat měřený subjekt tepelné zátěži a následně opět změřit klidovou tepovou frekvenci, přičemž toto navýšení lze prohlásit za tzv. tepelné pulsy [29].

Problematikou změny tepové frekvence způsobenou mechanickými a tepelnými faktory se blíže zabýval již VOGT a kol. [64] ve svém článku z roku 1973. Při svých pokusech se snažil detekovat vlivy a jejich spojení se srdeční frekvencí. Bylo zjištěno, že zvýšení tepové frekvence vlivem tepelných faktorů závisí především na mechanické práci, kterou měřený subjekt vykonává a na prostředí, které vyvolává tepelný stres. Příslušné vlivy je možné odhadovat s dostatečnou přesností i při měření srdeční frekvence v minutových intervalech. Tepelná složka srdeční frekvence je pak funkcí rektální teploty a střední teploty kůže, motorická složka[28] je poté funkcí mechanického výkonu, přičemž obě složky působí kumulativně [64].

[28] Motorickou složkou srdeční frekvence je v tomto kontextu myšleno navýšení srdeční frekvence vlivem navýšení fyzické zátěže.

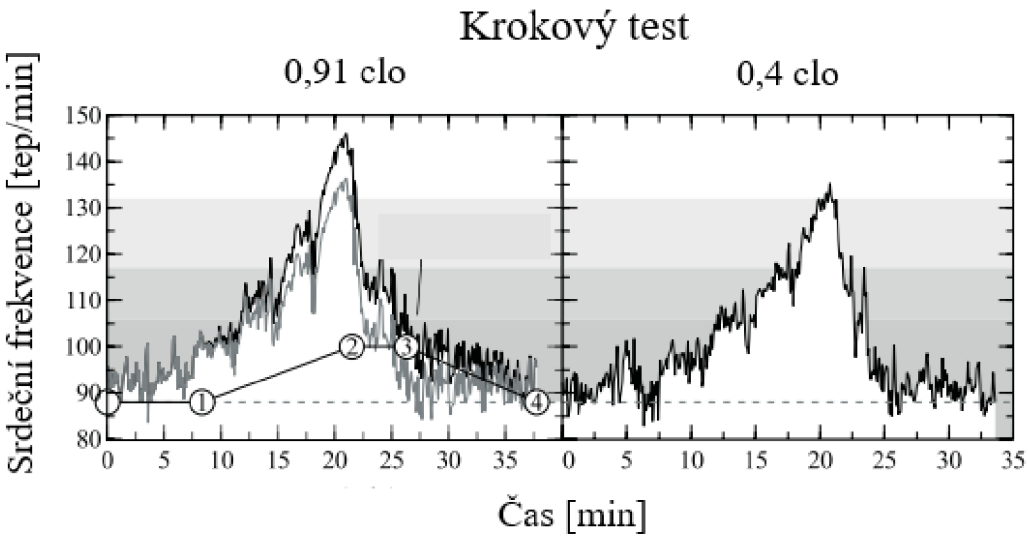
Odhadem metabolické aktivity z tepové frekvence při korekci na tzv. termální pulzy (zvýšení tepové frekvence vlivem tepelné zátěže) se zabývala studie dle KAMPMANN a kol. [65]. Za přítomnosti klimatického stresu nebo při vysokých úrovních fyzické pracovní zátěže dochází ke zvýšenému průtoku periferiemi na povrchu kůže, čímž se výrazně zvyšuje přenos tepla konvekcí. Ukázalo se, že na srdeční napětí mají tepelné pulzy vliv až ze 30 %. Proto při odhadu metabolické aktivity v teplotně diferencovaných podmínkách je nutné se zvýšením srdeční frekvence, které je způsobeno snahou těla se intenzivněji chladit, počítat [65].

Očišťováním srdeční frekvence o tepelnou složku se věnovala studie dle DUBÉ a kol. [63]. Je zřejmé, že tepelné tepy jsou realitou, když je měřený subjekt vystaven náročným podmínkám. Problémem však je, že při predikci tepelného pocitu právě tyto tepy zvyšují nepřesnost predikčních modelů. Proto je důležité zjistit tepovou frekvenci, která bude očištěna od této složky. Nespornou výhodou měření srdeční frekvence je, že se jedná o neinvazivní metodu, pomocí které lze odhadnout metabolickou aktivitu, která je vstupem do velkého množství indexů tepelné zátěže (PHS, WBGT, PMV-PPD). Správným odstraněním (očištěním) tepelné složky srdeční frekvence lze tak dosáhnout přesnějších predikcí energetického výdeje potažmo predikce tepelného pocitu měřeného subjektu [63].

DUBÉ a kol. [63] ve své studii zkoumali 41 dělníků pracujících v lesních podmínkách, kterým byly nakázány během pracovního dne 10minutové pauzy v sedě pro odhalení tepelných pulzů[29]. Inspirace přitom byla čerpána ze studie VOGTA a kol. [64]. Dle studie [63] se tepelná složka pulzů pohybovala v rozmezí 0–38 bmp[30]. Přičemž tohle rozmezí bylo závislé nejen na okolních tepelných podmínkách, ale také na izolačních vlastnostech oděvu. Pokud se použila surově naměřená hodnota HR[31] byla nadhodnocena hodnota $VO_2$ až o 30 %. Hodnota $VO_2$ odhadnutá z korigované HR se staticky nelišila od přesně měřené $VO_2$ [63].

[29] Tepelné pulzy = termální pulzy, jedná se o zvýšení tepové frekvence vlivem tepelného stresu
[30] bmp = z anglického beats per minute (tepů za minutu)
[31] HR = heart rate = srdeční frekvence

Jak bylo naznačeno ve studii výše, pro odhad metabolické aktivity ze srdeční frekvence je důležité nejen přesně definovat fyzickou činnost, okolní podmínky, ale také tepelné vlastnosti oděvu. Tímto tématem se zabýval ve své studii DUBÉ a kol. [66]. Níže na obrázku 26 je zobrazen vliv změny tepelného odporu z 0,91 clo na 0,4 clo při krokovém testu[32]. Z tohoto obrázku je patrné, že při totožném testu a totožných klimatických podmínkách byla naměřena rozdílná HR, právě vlivem rozdílného odporu oděvu.




*Obrázek 26 Změna srdeční frekvence v závislosti na typu oděvu [66]*

Pro možnost predikce metabolické aktivity ze srdeční frekvence je nutné užít buď jednodušší výpočetní vztah nebo predikční model. Velmi často je však nutné zadat pro přesný výpočet maximální srdeční frekvenci $HR_{max}$. Jedná se spíše o teoretickou hodnotu, kterou lze odhadnout podle velkého množství rovnic, pro příklad jsou uvedeny ty nejznámější *(6.3), (6.4), (6.5)* [67], [31]:

$$HR_{max} = 220 - věk \tag{6.3}$$

$$HR_{max} = 208 - 0{,}7A_d \tag{6.4}$$

$$HR_{max} = 205 - 0{,}62\ A_d \tag{6.5}$$

$HR_{max}$… odhadovaná maximální tepová frekvence [tep/min],

$A_d$… plocha lidského těla [m$^2$].

[32] Krokový test je speciální typ testu, kdy měřený subjekt vystupuje na schody o přesně definované frekvenci a výšce schodu, přičemž výška schodu se v jednotlivých fázích liší. Mění se tak intenzita pohybu potažmo i srdeční frekvence. Tento krokový test je také nazýván Meyer and Flengi test [95].

### 6.1.1 Vztah mezi HR a MR

Souvislost mezi srdeční frekvencí a produkcí metabolismu lze měřit ze záznamu srdeční frekvence v různých etapách svalového zatížení v klimaticky neutrálním prostředí. Nejdříve je uveden vztah dle ČSN ISO 8996 [31], která popisuje tento vztah pro široký rozsah od 120 tep/min až po 20 tepů pod $HR_{max}$. V tomto rozsahu lze zanedbat vliv mentální složky na srdeční frekvenci [31].

$$HR = HR_0 + RM.(MR - M_0) \tag{6.6}$$

*HR*… srdeční frekvence [tep/min],

$HR_0$…srdeční frekvence v klidu za neutrálních tepelných podmínek [tep/min],

*MR*…produkce metabolismu [W/m$^2$],

$M_0$…produkce metabolismu v klidu [W/m$^2$],

*RM* … zvýšení srdeční frekvence na jednotku metabolismu.

$$RM = (HR_{max} - HR_0)/(MWC - M_0) \tag{6.7}$$

Pro výpočet $HR_{max}$ je v tomto případě užita rovnice *(6.5)*.

*MWC*…maximální pracovní kapacita [W/m$^2$], jejíž výpočet je uveden níže:

Muži:

$$MWC = (41{,}7 - 0{,}22věk).{m_b}^{0{,}666} \tag{6.8}$$

Ženy:

$$MWC = (35{,}0 - 0{,}22věk).{m_b}^{0{,}666} \tag{6.9}$$

$m_b$…hmotnost [kg].

Maximální pracovní kapacita MWC je veličinou, kterou je teoreticky možné získat z poměrně velkého množství empiricky získaných vztahů. Podrobněji se přesností odhadu MWC dle predikčních rovnic zabývá studie dle MALCHAIRE a kol. [67]. V této studii lze nalézt také níže uvedenou predikční rovnici pro stanovení metabolické aktivity ze srdeční frekvence, viz rovnice *(6.10)* [67]. Přičemž výpočetní vztah je značně inspirován normou ČSN ISO 8996 [31].

$$MR = \frac{(MWC - M_0)}{(HR_{max} - HR_0)}(HR_{wm} - HR_0) + M_0 \tag{6.10}$$

$MWC$…maximální pracovní kapacita [W/m$^2$],

$M_0$…produkce metabolismu v klidu [W/m$^2$],

$HR_{max}$… odhadovaná maximální tepová frekvence [tep/min],

$HR_0$…srdeční frekvence v klidu za neutrálních tepelných podmínek [tep/min],

$HR_{wm}$…průměrná srdeční frekvence ve sledovaném období [tep/min],

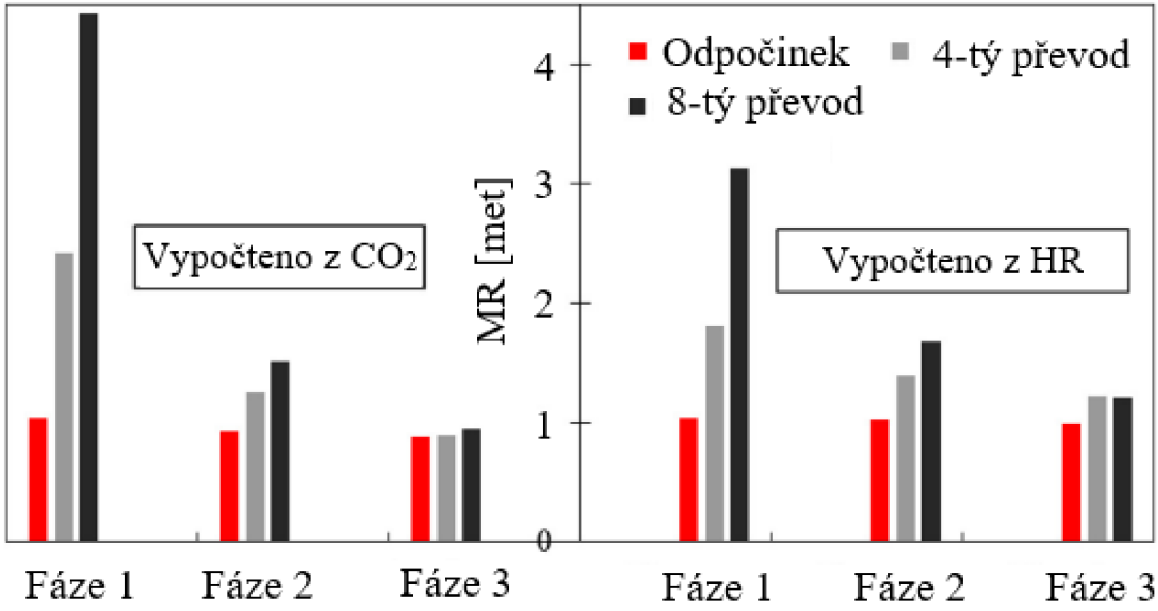
$MR$… produkce metabolismu [W/m$^2$].

### 6.1.2 Validační studie odhadu MR z HR

Ve vědecké studii dle JI a kol. [68], která se zabývala hodnocením tepelného komfortu na základě změny metabolické aktivity, lze pozorovat důležitost přesného odhadu tohoto parametru. Mimo jiné se tato studie zabývá také přesností odhadu metabolické aktivity z produkce $CO_2$ a srdeční frekvence HR. Studie se účastnilo 31 subjektů, které šlapaly na spinovém kole o různých intenzitách (4. a 8. převod) 8 min a dále odpočívaly v poloze v sedě celkem 22 min. V této studii je také popsáno, že lidskému tělu trvá v průměru 7-9 minut, aby se po cvičení zotavilo. Toto však platí pro výše uvedenou činnost a definovaný čas [68].

Závěrem této studie je také tvrzení, že odhad MR z produkce $CO_2$ je metodou, kterou lze s dostatečnou přesností využít při výzkumných činnostech týkajících se tepelného komfortu. Je také důležité brát ohled na úzký vztah mezi tepelným komfortem a metabolickou aktivitou, která se, jak již bylo zmíněno, liší nejen pro jednotlivé činnosti, ale také pro subjekty s rozdílnou genetickou výbavou [68].

Níže na obrázku 27 je zobrazeno porovnání metabolické aktivity vypočtené z produkce $CO_2$ a ze srdeční frekvence. Měření bylo opakováno třikrát při různých podmínkách, přičemž každé bylo rozděleno do tří fází. V prvním měření (červeně) ve všech třech fázích byl měřen odpočinek. Ve druhém měření (šedě) v první fázi šlapání na kole při 4. převodu a poté druhá fáze relaxační a třetí činnost sezení. Poslední měření (černě) v první fází šlapání na 8. převodu a poté druhá fáze relaxační a třetí činnost klidné sezení. Je patrné, že dle této studie [68] lze odhadnout odpočinek či šlapání na lehčí převod z HR s poměrně dobrou přesností. Problematický je odhad při vyšší fyzické zátěži, na obrázku níže reprezentována šlapáním na 8. převod. V tomto případě došlo k podhodnocení odhadu MR ze srdeční frekvence, a to o cca 1 met. Za povšimnutí také stojí měření ve fázi 3, ve které se do měření po činnostech šlapání promítla zvýšená MR při odhadu ze srdeční frekvence (vlivem jejího doznívajícího navýšení), přičemž dle měření $CO_2$ by nemělo k navýšení docházet [68].




*Obrázek 27 Odhad MR z CO2 a z HR [68]*

## 6.2 Odhad metabolické aktivity dle tabelovaných hodnot

Odhadem metabolické aktivity se lidé zabývali ještě před dynamickým rozvojem nositelných měřičů, zejména ve spojení s pracovní zátěží na pracovišti. Metabolický výdej bylo sice možno změřit pomocí stacionárních metabolických vozíků, nicméně měření je poměrně časově i finančně náročné. Zprvu zejména pro zjednodušení v současnosti pro hrubý odhad energetického výdeje slouží tabelované hodnoty. Konkrétně např. norma ČSN 8996 [31], ve které jsou zobrazeny základní hodnoty energetického výdeje pro jednotlivé profese i činnosti [31].

Obsáhlejším zdrojem tabelovaných hodnot je Kompendium fyzických a pohybových aktivit, které uvádí energetický výdej pro širokou paletu činností [60], [69] nebo je možné navštívit webovou stránku [70], která slouží jako elektronická databáze činností, pro něž je možné tabelovanou hodnotu energetického výdeje dohledat.

## 6.3 Odhad metabolické aktivity pomocí sporttesterů

V současné době došlo k poměrně významnému rozvoji nositelných měřičů, mezi které patří nejen sporttestery a chytré hodinky, ale i nejrůznější sportovní náramky. Obecně lze říci, že sporttester odhaduje energetický výdej pomocí modelů, do kterých vstupuje nejen srdeční frekvence, ale např. i údaje o saturaci kyslíku v krvi, akcelerometru, krokoměru, výškoměru a mnoha dalších. Z tohoto důvodu je tato technologie předurčena k využití v mnoha oblastech např. zdravotnictví, sportu, technice apod. Důležité je však zmínit, že právě přesnost odhadu těchto zařízení je kýženým parametrem, který vyvolává neustále spory o jejich možném použití.

Studie dle ROOS a kol. [71] se zabývala validací tří sporttesterů, konkrétně Suunto Ambit 2, Garmin Forerunner 920 XT a Polar V800. Této studie se zúčastnilo 12 mužů a 8 žen, tedy celkem 20 dobrovolníků ve věku 23,90 ± 1,92 roku s výškou 1,74 ± 0,08 cm a hmotností 66,9 ± 10,2 kg. Měřené subjekty vždy byly měřeny dvakrát, a to s odstupem větším než 24 hodin, ale menším než dva týdny. Důležité bylo, aby se probandi vyhnuli alespoň 24 h před

testováním náročné fyzické zátěži a alkoholu. Nutné bylo, aby před příchodem do laboratoře alespoň 6 hodin nejedli, ani nepili kofeinové nápoje. Etalonem pro měření byl přístroj Moxus, který využívá nepřímé kalorimetrie. Testovanými činnostmi byl běh o střední až vysoké intenzitě. Závěrem studie bylo, že přesnost odhadu energetického výdeje velmi závisí na intenzitě dané činnosti. Nejmenší MAPE dosahovaly hodinky Polar V800, pro běh o střední intenzitě pohybu. Dobrých výsledků, tj. MAPE kolem 12 % dosáhl také sporttester Garmin Forerunner 920 XT pro běh o vyšší intenzitě. Nicméně důležitým závěrem studie bylo tvrzení, že při činnostech o vysokých intenzitách dochází k výraznému podhodnocení odhadu MR [71] a je tedy nutné se do budoucna na tuto oblast výzkumu zaměřit.

Další rozsáhlá studie, která se zabývala přesností odhadu počtu kroků, uražené vzdálenosti a energetického výdeje při sportovních aktivitách, převážně běhu, byla publikována autory WAHL a kol. [72]. Studie se účastnilo 10 mužů a 10 žen, kteří zkoušeli přesnost jedenácti sporttesterů včetně hodinek od společnosti Garmin (Garmin Vivofit, Garmin Vivosmart, Garmin Vivoactive a Garmin Forerunner 920 XT). Kriteriálním měřením byla nepřímá kalorimetrie, přesněji měření energetického výdeje pomocí přístroje Metamax[33]. Zkoumanými činnostmi byla vnitřní a venkovní chůze potažmo běh o různých rychlostech. Výsledky velmi závisely na zvoleném modelu sporttesteru, přičemž nejlepších výsledků dosahovala většina sporttesterů od společnosti Garmin pro činnost chůze o rychlosti 4,3 km/h, kde se MAPE u některých pohybovala i pod hranicí 5 %. V této studii jsou dále zmíněny limity testování spojené s měřením nepřímou kalorimetrií, které spočívají zejména v postupné degradaci kyslíkového senzoru v závislosti na počtu měření a době celkového měření [72].

Spíše se zdravotní perspektivy se na problematiku přesnosti měření srdeční frekvence a energetického výdeje pomocí sporttesterů dívá studie dle BOUDREAUX a kol. [73] z roku 2018. Studie se zúčastnilo 50 dobrovolníků, kteří zkoušeli přesnost 8 chytrých hodinek při dvou laboratorních testech v porovnání s metabolickým analyzátorem (není přesně definováno, který byl použit). Kritériem přesnosti odhadu energetického výdeje pomocí sporttesterů byla MAPE[34] <10 %, což bylo v souladu se studií dle LEE a kol. [74] i NELSON a kol [75]. V této studii této přesnosti nebylo dosaženo, a tak nebyly sporttestery shledány jako přístroje, které dovedou měřit energetický výdej s dostatečnou přesností, nicméně vykazovaly dostatečnou přesnost (MAPE <10 %) pro měření srdeční frekvence [73].

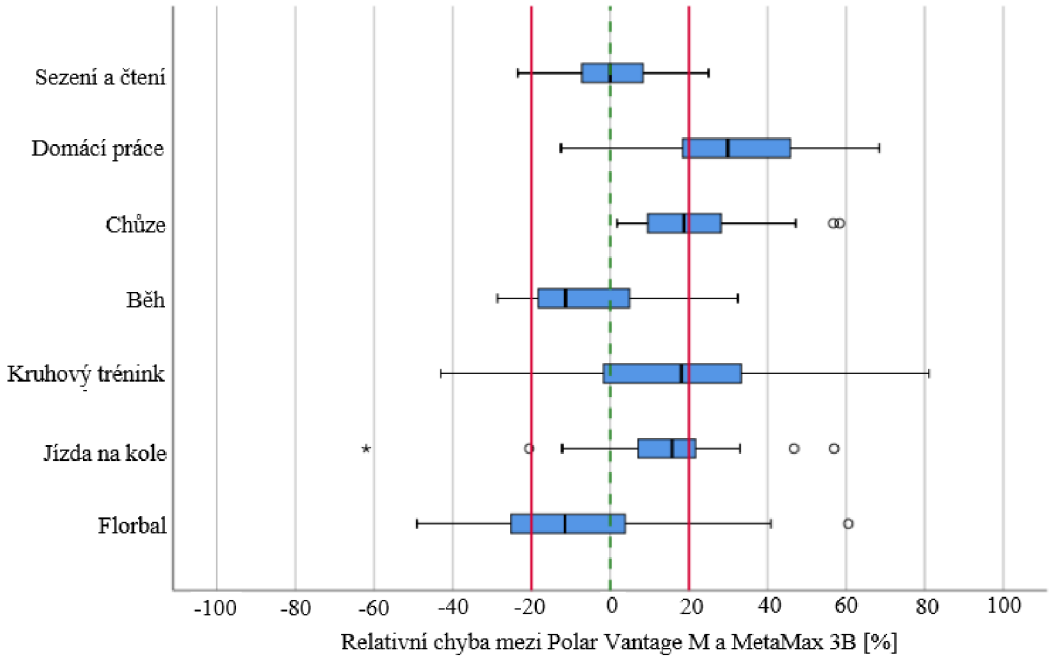
Další studie, která se zabývala přesností odhadu energetického výdeje pomocí sporttesterů v porovnání s nepřímou kalorimetrií, která byla v tomto případě zastoupena přímo přístrojem Oxycon Mobile, byla studie dle WOODMAN a kol. [76] z roku 2017. Studie se celkem účastnilo 28 dobrovolníků, kteří byli testováni při 11 běžných činnostech. Společnost Garmin v tomto testování zastupovaly hodinky Garmin VivoFit. Výsledkem této studie je, že pro běžné aktivity dosahují všechny chytré hodinky včetně Garmin VivoFit větší MAPE než 10 %, tedy

[33] Metamax je dalším ze skupiny zařízení, které využívá nepřímou kalorimetrii [99]. Toto zařízení je v současné době na trhu. Nabízí je společnost COMPEK MEDICAL SERVISES s.r.o., která dodává kompletní vybavení lékařských ordinací od roku 1993 [100].
[34] MAPE = mean percentage error v překladu střední absolutní chyba

nedosahují dostatečnou přesnost pro technické či zdravotní aplikace [76]. Za zmínku stojí, že sporttester od firmy Garmin byl při měření umístěn na méně dominantním zápěstí[35] [76].

S rozvojem technologií nabízí chytré hodinky zajímavé možnosti nových aplikací v medicínských oborech. Testování dle REDDY a kol. [77] se zabývá přesností měření HR a EE pomocí dvou sportovních hodinek (Garmin Vivosmart HR+ a Fitbit Charge 2) v porovnání se zařízením Cosmed K5 (nepřímou kalorimetrií). Je zde popsán také zajímavý pohled na problematiku, jelikož nositelná zařízení jsou schopna dodávat signál o měření HR a EE v reálném čase neinvazivní metodou. To by mohlo mít výrazné výhody, jelikož by bylo možné sledovat pacientovi aktuální reakce např. na daný lék. Nicméně důležité je právě definovat přesnost odhadu HR a EE pomocí těchto zařízení. Závěrem této studie je, že oboje výše zmíněné hodinky vykazují dobrou přesnost v měření HR s rozumným odhadem EE, pro činnosti s nízkou až střední intenzitou. V této studii je také poukázáno u hodinek na důležitost použití indikátoru aktivity, jelikož docházelo k výrazně přesnějšímu odhadu EE [77]. Přesnost v odhadu EE byla také výrazně snížena, pokud nedocházelo k pohybu zápěstí např. při cyklistické ergometrii [77].

Zkoumáním přesnosti odhadu energetického výdeje pro běžné činnosti se také zabývala validační studie dle GILGEN-AMMANN a kol. [78]. V této studii byl použit sporttester Polar Vantage M, přičemž jako kriteriální měření byl zvolen přístroj MetaMax 3B. Studie se účastnilo 30 dobrovolníků mužského i ženského pohlaví. Výsledky studie jsou zobrazeny na obrázku 28. Z tohoto obrázku je patrné, že hodinky vykazovaly nejmenší relativní chybu pro činnost sezení, naopak největší rozptyl byl u nestabilních činností, kde byl zařazen intenzivní nepravidelný pohyb zápěstí či celé paže. Dle této studie lze dané výsledky zařadit mezi srovnatelně nejlepší, kterých lze pomocí sporttesterů dosáhnout [78].

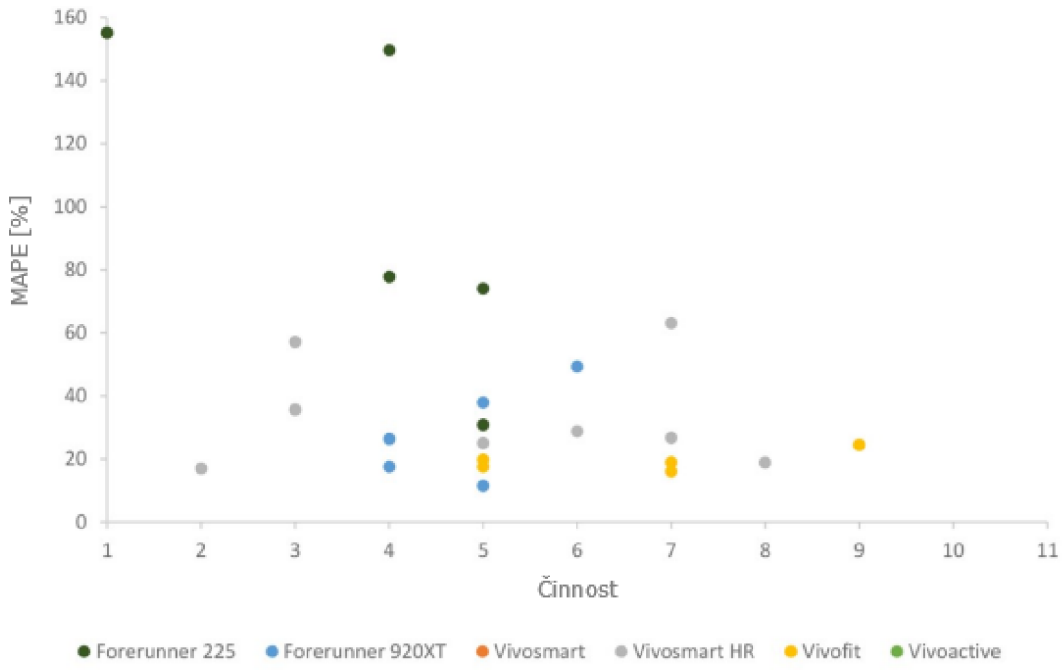



*Obrázek 28 Relativní chyba, upraveno z [78]*

[35] Dominantní zápěstí závisí na lateralitě, tzn. na typu přednostního užívaní jednoho párového orgánu [101]. Zjednodušeně lze říci, že pro praváka je méně dominantní levé zápěstí a pro leváka opačně.

Tvrzení, že nositelné přístroje dovedou přesně měřit srdeční frekvenci potvrzuje také studie dle WALLEN a kol. [79] z roku 2016. Tato validační studie se zabývala přesností měření EE a HR pomocí 4 komerčně dostupných chytrých hodinek v porovnání s elektrografií (HR) a nepřímou kalorimetrií (EE). Měřenými činnostmi bylo sezení, stání, běh na běžeckém pásu a jízda na vnitřním kole, přičemž pauzy mezi prvními dvěma činnostmi byly 1 min a mezi posledními 5–7 min. Dle výsledků dané studie, nejsou nositelné sporttestery zcela vhodné pro měření energetického výdeje, jelikož nedosahují dostatečné přesnosti [79].

Výzkumníci EVENSON a SPADE [80] vytvořili systematický sumář studií, které se zabývaly přesností odhadu počtu kroků, uražené vzdálenosti, EE a HR hodinek od společnosti Garmin, a byly vydány do konce roku 2018, navazují tak na práci z roku 2015, která se zabývala validací sportovních náramků od firmy Fitbit a Jawbone [81]. Shromáždili tak data z 32 studií zabývajících se touto problematikou, přičemž kvalitu sporttesteru škálovaly podle koeficientu korelace a střední absolutní chyby (MAPE). Jako akceptovatelná MAPE byla určena chyba <5 % při kontrolovaných podmínkách a <10 % u činností, u které nelze pro všechny definovat stejnou intenzitu (např. domácí činnosti) [80].

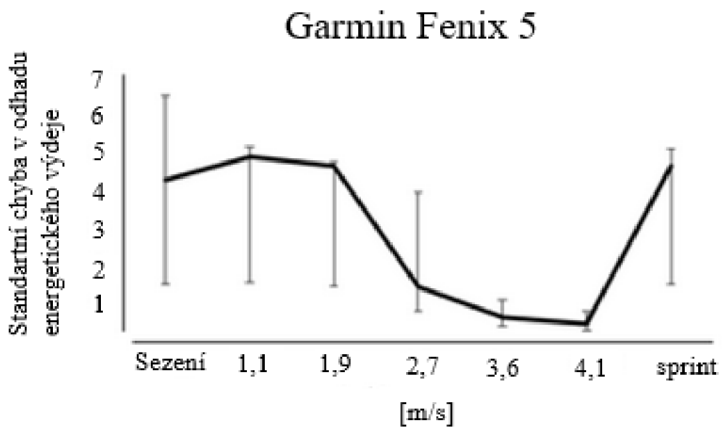



*Obrázek 29 Zobrazení porovnání MAPE pro jednotlivé činnosti, upraveno z [80]. Činnost 1 – odpočinek, 2 – běžné denní aktivity, 3 – odporový trénink, 4 – chůze, 5 – běh, 6 – sprint, 7 – jízda na kole, 8 – maximální výkon kolo, 9 – dvoudenní nošení, 10 – přerušované*

Na obrázku 29 je zobrazena MAPE jednotlivých sportovních náramků od společnosti Garmin, pro různé činnosti. Z obrázku je patrné, že při odhadu energetického výdeje dosahovaly pouze hodinky Garmin Forerunner 920XT MAPE kolem 10 % a to pouze při běhu. Zajímavé je poznamenat, že dle recenze [80], která shromáždila studie do roku 2018, je nutné zdůraznit, že v roce 2019 byly na trhu k dispozici již pouze výše zmíněné hodinky s nejnižší MAPE. Tahle skutečnost poukazuje právě na velmi dynamický vývoj nositelných technologií, z čehož plyne že v současné době již můžou být výsledky zastaralé.

Recenzi na téma přesnosti odhadu energetického výdeje vytvořili také autoři O'DRISCOLL a kol. [82], kteří shromáždili data z 60 studií zabývajících se tímto tématem. Vědci poukazují na výrazný vliv typu činnosti na přesnost odhadu EE. V recenzi je také zdůrazněna potřeba zvýšení přesnosti odhadu EE pomocí těchto zařízení, které lze docílit lepším spojením akcelerometrie a monitorů srdeční frekvence [82].

Ve studii dle DÜKING a kol. [83] byla zkoumána přesnost odhadu metabolické aktivity pomocí sporttesteru Garmin Fenix 5, což je předchůdce testovaných hodinek v této práci. Studie se celkem zúčastnilo 25 subjektů, přičemž testovanými činnostmi bylo sezení, chůze a běh různými rychlostmi. Měření vždy trvalo 5 min, přičemž jako referenční přístroj pro hodnocení energetického výdeje byl využit Metamax 3B. Bližší porovnání je zobrazeno na obrázku 30 přičemž na ose y je zobrazena standartní chyba[36]. Z obrázku je zřejmé, že nejmenší chyby sporttester dosahoval pro činnosti střední až vyšší intenzitě pohybu.

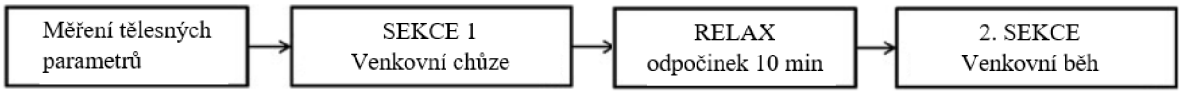



*Obrázek 30 Energetický výdej Garmin Fenix 5, upraveno z [83]*

Komplexní studie, která se zabývala testováním validity tří komerčně dostupných sporttesterů (Garmin Fenix 6, Huawei Watch a Apple Watch Series 6), byla uveřejněna v září roku 2022 autory LE a kol. [84]. Studie se účastnilo 20 probandů, 10 mužského a 10 ženského pohlaví, s BMI 18,5 – 25, přičemž všichni uvedli, že žijí aktivním sportovním životem (alespoň 3krát týdně sportují) [84].

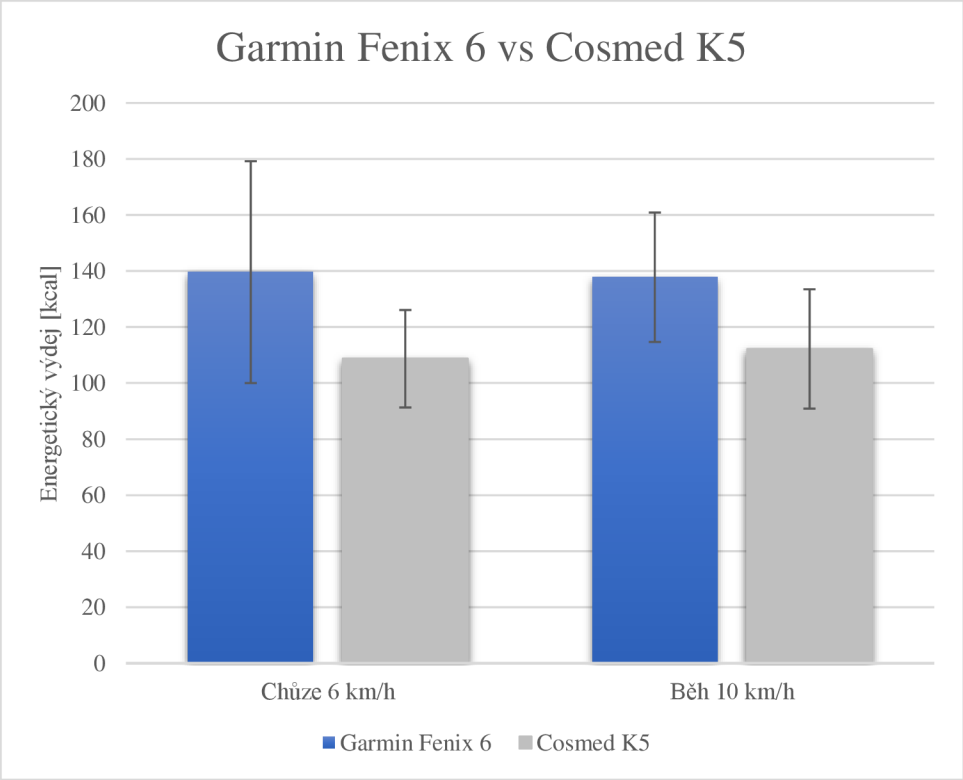
Data byla sbírána během jedné návštěvy, přičemž měřené subjekty byly požádány, aby alespoň 6 hodin před začátkem měření nekonzumovaly energetické či kofeinové nápoje a jídlo. Měření bylo rozděleno do dvou sekcí, kdy první sekci předcházelo základní antropologické měření. V první sekci měřené subjekty šly 2 km průměrnou rychlostí 6 km/h (po vyhodnocení 6,15 ± 0,29 km/h), poté následovala 10minutová relaxační pauza v sedě a následovala druhá sekce, 2 km běh rychlostí 10 km/h (po vyhodnocení 10,94 ± 0,99 km/h). Celé měření bylo realizováno na ovále s délkou 400 m. Venkovní data byla následující: teplota 16,5 ± 2,6 °C, relativní vlhkost 56,7 ± 14,3 % pro chůzi a 13,9 °C a 62,6 ± 21,8 % pro běh. Jako etalon bylo použito zařízení Cosmed K5 [84]. Na obrázku 31 je schematicky zobrazen měřicí protokol [84].

[36] Standartní chybou se v tomto případě rozumí 90 % z variačního koeficientu.




*Obrázek 31 Plán měření, převzato z [84]*

Výsledky jsou zobrazeny na níže uvedeném obrázku 32. Je patrné, že sporttester Garmin Fenix 6 Pro nadhodnocoval energetický výdej pro obě zvolené venkovní aktivity. Za povšimnutí stojí, že chybový interval chytrých hodinek pro druhý testovací scénář poklesl, jelikož pro běh rychlostí 10 km/h vykazovaly hodinky konzistentnější údaje [84].




*Obrázek 32 Energetický výdej komparace chytrých hodinek s přístrojem využívajícím nepřímou kalorimetrii, vlastní zpracování, upraveno z [84].*

# 7 Průběh vlastního měření

Pro měření metabolické aktivity pomocí nepřímé kalorimetrie byl použit přístroj Oxycon Mobile, viz kapitola 5.3.1 Oxycon Mobile, který je zařazen do kategorie lékařských přístrojů, lze tedy pomocí něj diagnostikovat i spirometrické vlastnosti lidského těla (např. kapacitu dýchacího systému apod.). Metabolická aktivita změřená pomocí nepřímé kalorimetrie je dostatečně přesná na to, aby mohla být uvedena jako etalon pro validaci sporttesteru Garmin Fenix 6X Pro, který byl blíže specifikován v bakalářské práci autora [85]. Při tomto tvrzení vycházíme zejména z předchozích validačních studií, kdy se pro validaci chytrých hodinek běžně nepřímá kalorimetrie používá.

## 7.1 Dobrovolníci a podmínky měření

Nejprve bylo nutné definovat počet testovaných osob, které se budou experimentu účastnit. Na základě výše uvedených validačních studií např. [51], [58], [73] , [71] a dle dostupných možností, byl stanoven optimální počet probandů pro plánované měření. V uvedených výzkumech se jednalo o 7–50 dobrovolníků, testování v této práci se účastnilo 15 probandů. Dále bylo nutné zaměřit na vyloučení co možná nejvíce nepříznivých vlivů, které by měření mohly ovlivnit. Ve výše uvedených studií bylo usouzeno, že pokud proběhne měření alespoň dvakrát s odstupem nejméně dvou dní, dojde k vyloučení změny metabolické aktivity vlivem denní doby. Při definici této skutečnosti bylo opět vycházeno z validačních studií uvedených výše např. [71].

*Obrázek 33 Hodinky Garmin Fenix 6X Pro, vlastní zdroj*

V našem případě se testování účastnilo tedy 15 dobrovolníků mužského pohlaví s ve věku 28 ± 5 let[37], s hmotností 83,2 ± 13,5 kg, výškou 180 ± 7 cm a indexem tělesné hmotnosti BMI 25,6 ± 2,6 kg/m$^2$. Všichni probandi byli před zahájením testu důsledně informováni a poučeni. Samotné testování probíhalo od 14.2.2023 do 8.3.2023, v prostorách VUT FSI Brno.

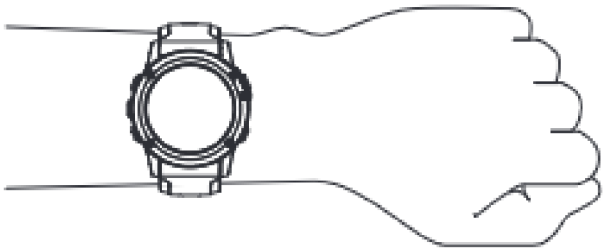
Před zahájením ostrého testování bylo učiněno systematicky několik pretestů nejen z důvodu prozkoušení všech činností, ale také pro seznámení s obsluhou všech zařízení. K testování byly použity hodinky Garmin Fenix 6X Pro, viz obrázek 33, dále zařízení Oxycon Mobile, na který byla napojena dýchací maska. Pro činnosti o střední a vyšší intenzitě bylo dále použito kolo připojené k trenažéru, který je schopen regulovat odpor díky aplikaci ROUVY [86].

Na obrázku 34 je zobrazen Oxycon Mobile, trenažér s kolem a použitá dýchací maska při měření.

[37] Rozpětí vždy značí směrodatnou odchylku.

*Obrázek 34 Oxycon Mobile, Kolo s trenažérem, dýchací maska*

Měření probíhalo v dopoledních a odpoledních hodinách ve všední dny, přičemž měřené subjekty byly předem poučeny, aby se vyvarovaly alespoň tři hodiny před měřením konzumaci kofeinových nápojů a těžkých jídel. Nežádoucí byla také intenzivní fyzická aktivita 24 hodin před začátkem měření či požití návykových látek. V průběhu testování byla naměřena průměrná teplota 21,6 ± 0,3 °C a relativní vlhkost 24 ± 4 %. Hodinky Garmin Fenix 6X Pro byly umístěny vždy na levé zápěstí probandů, viz obrázek 35, přičemž toto umístění korespondovalo s nastavením samotného sporttesteru. Probandi byli před měřením vždy předem požádáni, aby přišli se sportovním oblečením, tj s funkčním tričkem a kraťasy.



*Obrázek 35 Umístění hodinek Garmin Fenix 6X PRO [93]*

## 7.2 Návrh postupu měření

Pro ověření přesnosti odhadu metabolické aktivity pomocí sporttesteru bylo nutné navrhnout postup měření. Ten byl vytvořen na základě inspirace z validačních studií uvedených v této práci. Je nutné poukázat na důležitost stanovení průběhu samotného měření, který může silně ovlivňovat výsledky, a tak i zkreslit celkové naměřené hodnoty.

Důležitost je však také přikládána sestavení samotného testu. Jelikož se z hlediska využití přístroje Oxycon Mobile, který má široké medicínské využití, lze se často potkat s termínem CPET test[38] [87]. Návrhem medicínských testů se zabývá velké množství vědeckých prací, pro zmínku je uveden odborný článek dle GOSSELINK a spol. [88], ve kterém se lze dočíst o návrhu základních medicínských testů, jehož součástí je 6minutový a 12minutový test chůze. V tomto

[38] CPET test [87]= (Cardiopulmonary Exercise testing), kardiopulmonální zátěžové testování v překladu lze také označit jako CPEX. Jedná se o test, který zkoumá kardiopulmonální funkční kapacity, při různých typech cviků o různých intenzitách a zátěžích, přičemž je zkoumán stav kardiovaskulárního systému pacienta nebo jednotlivce.

článku jsou také uvedeny empirické rovnice pro zjištění orientační hodnoty $VO_{2max}$, které však slouží převážně pro medicínskou praxi [88].

Spíše biologický náhled na celou problematiku testování pomocí nepřímé kalorimetrie a na interpretaci naměřených výsledků poskytuje rozsáhlá publikace, jejíž autory jsou COOPER a STORER [89].

Aby mohlo být testování vzájemně porovnatelné, bylo nutné dodržet nejen totožný postup v průběhu měření, ale také přípravu před jeho zahájením. Nejprve bylo nutné založit v počítači daného dobrovolníka a vyplnit jeho základní tělesné metriky, aby bylo zajištěno přesné měření z hlediska přístroje Oxycon Mobile, jedná se o první nezbytný krok potřebný k uskutečnění měření.

Jelikož je Oxycon Mobile složitější medicínské zařízení, je nutné vždy při zapnutí nejprve provést fázi zahřívání. Tato fáze trvá 15 minut a dojde během ní k vyrovnání teplot v zařízení. Dalším krokem, který má zajistit přesné měření, je kalibrace, kterou má Oxycon Mobile rozčleněnou na tři fáze. V první fázi jsou kalibrovány vnější podmínky, které zahrnují okolní teplotu, relativní vlhkost, barometrický tlak a nadmořskou výšku. Dalším krokem je kalibrace objemu, tedy průtokoměru, který je součástí mobilní jednotky přístroje Oxycon Mobile. Poslední fází je kalibrace analyzátorů plynu. To je uskutečněno pomocí kalibračního plynu, který má přesně definováno složení (poměr kyslík, dusík), které musí být předem zadáno do kalibrátoru přístroje Oxycon Mobile. Vůči této přesné hodnotě jsou poté analyzátory kalibrovány, přičemž po dokončení je přístroj již připraven k měření. Tuto proceduru zahřívaní a kalibrace bylo vždy nutné udělat před příchodem probanda do laboratoře.

Při dostavení dobrovolníka do laboratoře došlo nejprve k jeho přípravě (oblečení, nastavení dýchací masky a popruhů), aby nebylo měření nikterak negativně ovlivněno např. netěsnostmi v upevnění dýchací masky. Z vlastních zkušeností, které jsme nasbírali během pretestů, víme, že právě těsnost upevnění dýchací masky má na konečný výsledek nezanedbatelný vliv, proto je nutné již na počáteční přípravu před měřením klást podstatný důraz. Tato fáze zabrala cca 10 min, přičemž během ní došlo ve většině případů ke stabilizaci tepové frekvence dobrovolníka. Tento čas byl také využit k podrobnému vysvětlení celé procedury testování. Poté byly probandovi připevněny hodinky Garmin Fenix 6X Pro na levé zápěstí, které samozřejmě byly vždy nastaveny na tělesné metriky (výška, váha, pohlaví) měřeného subjektu i na danou aktivitu (např. jízda na kole). Poté bylo možné připevnit již zkalibrovaný přístroj Oxycon Mobile.

Následně byl dobrovolník vyzván k zahájení testu. Ještě však než samotné měření mohlo začít, byla provedena tzv. fáze nulování, která probíhá, když už je přístroj připojen k dýchací masce a upevněn v popruzích. Během této fáze došlo k poslednímu pročištění přístroje před měřením[39].

[39] Základní informace o přístroji Oxycon Mobile pocházejí z publikace: Návod k obsluze Oxycon Mobile [53]

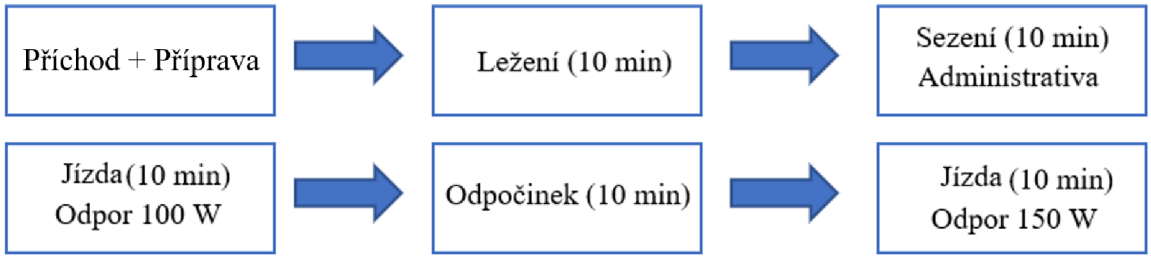
## 7.3 Popis průběhu testu

Testovací protokol byl navrhnut na základě technických, časových a kapacitních možností, přičemž bylo v maximální možné míře vycházeno z validačních studií uvedených výše. Před započetím měření byly subjekty uvedeny do polohy v leže, aby byly vyloučeny vlivy spojeny s přesunem do laboratoře [51]. Poté během dalších 10 minut byla sbírána data pro možnost naměření RMR (činnost ležení).

Poté byly měřené subjekty vyzvány, aby se přesunuly z polohy v leže a během dalších 10 minut byla měřena činnost práce v kanceláři (administrativní činnost). V průběhu této činnosti měli probandi za úkol přepsat do notebooku předem připravený text v tištěné formě. Jelikož u této činnosti nedochází k výraznému zvýšení tepové frekvence, tedy potažmo i energetického výdeje, bylo možno ihned po skončení přistoupit k měření činnosti jízda na vnitřním kole s přesně definovaným odporem.

Nejprve se jednalo o šlapání v nízkém tempu o odporu 100 W [57]. Doba měření byla stanovena na 10 min, přičemž bylo vycházeno ze studií [57] a [25]. Probandům vždy byla zobrazena jejich aktuální kadence šlapání, přičemž snahou bylo, aby ji udržovali co nejkonzistentnější. Odpor 100 W regulovala přes připojený trenažér aplikace ROUVY [86]. Poté byl stanoven povinný odpočinek, který trval maximálně 10 min, aby nedocházelo k ovlivnění měření pro jednotlivé činnosti. Poslední činností, která byla proměřena, bylo cyklování s mechanickým odporem 150 W [57] po dobu 10 min. Tímto úkonem bylo měření ukončeno.

Při návrhu počtu činností bylo vycházeno z validační studie [25], ve které bylo také realizováno měření dvou činností o nižší intenzitě a dvou o vyšší intenzitě. Schematicky je protokol měření zobrazen na obrázku 36.




*Obrázek 36 Schéma měřícího protokolu, vlastní zdroj*

Pro ilustraci jsou níže zobrazeny fotografie probandů v průběhu měření, viz obrázek 37. Vlevo je zobrazen proband přímo při vykonávání činnosti jízda na kole. Na pravém snímku je jiný proband, který plní odpočinkovou fázi mezi dvěma činnosti na kole. Samotný test byl pak sestaven tak, že byl fyzicky přívětivý (neohrožoval zdraví) pro všechny probandy tedy i pro ty, kteří neprovozují pravidelně žádnou sportovní aktivitu.

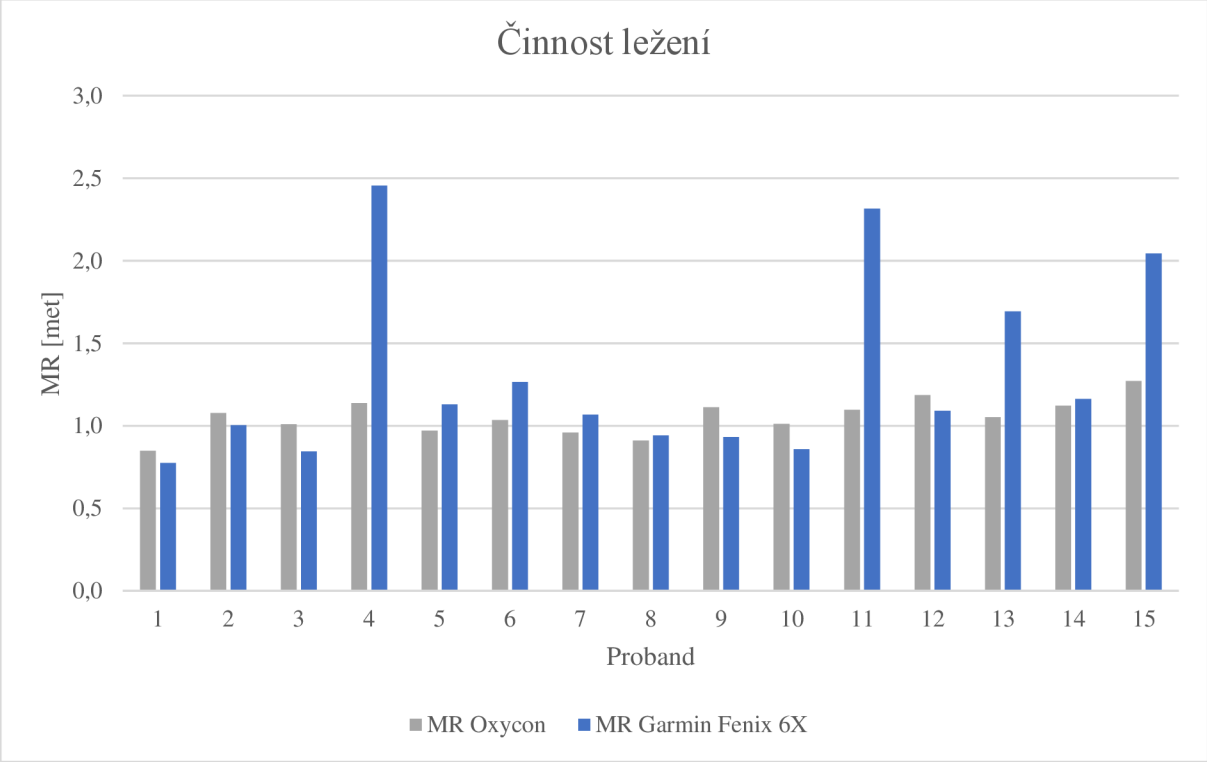
*Obrázek 37 Fotografie z testování, vlastní zdroj*

# 8 Výsledky s analýzou a diskuzí

Nejprve je nutné představit postup přepočtu hodnot, jelikož ani jeden z přístrojů neudává přímo explicitně hodnotu metabolické aktivity. Výpočtová metodika, která byla užita k přepočtu měřených hodnot z Oxycon Mobile na metabolickou aktivitu byla převzata z normy ČSN EN ISO 8966 [31], dle rovnic uvedených výše (*4.1*), (*4.2*) a (*4.3*), které jsou uvedeny v kapitole „4.3 Nepřímá kalorimetrie“, přičemž pro plochu lidského těla byl uvažován vzorec dle Duboise [9], který je také uveden výše v diplomové práci. V případě sporttesteru Garmin Fenix 6X Pro bylo nutné učinit přepočet[40] z energetického výdeje v kcal a času dané činnosti, na metabolickou aktivitu, přičemž opět byl užit přepočet pro plochu lidského těla dle výše zmíněné DuBoisovy rovnice [8].

## 8.1 Výsledky jednotlivých probandů pro vykonávané činnosti

První testovanou aktivitou byla činnost ležení. Níže na obrázku 38 jsou zobrazeny výsledky sporttesteru Garmin Fenix 6X Pro v porovnání s nepřímou kalorimetrií reprezentovanou medicínským zařízením Oxycon Mobile. Jedná se o podrobný graf, na kterém lze vidět porovnání na individuální úrovni pro jednotlivé probandy.




*Obrázek 38 Výsledky činnost ležení, vlastní zpracování*

[40] Pro přepočet z energetického výdeje v kcal na metabolickou aktivitu v met, byla použita níže uvedená rovnice. Je využito ekvivalence 1 kcal = 4175 J [1].

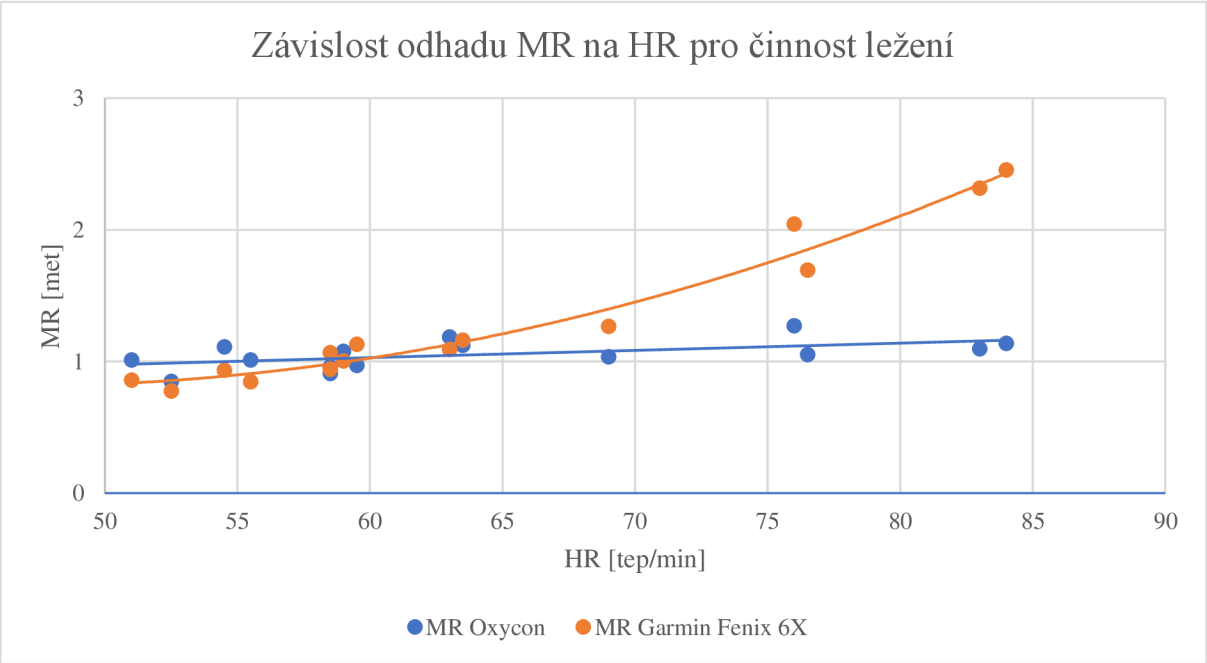
$$MR = \frac{EE.4175}{t.A_D.58{,}2}$$

$MR$… metabolická aktivita [met]
$EE$…energetický výdej [kcal]
$t$…čas, který činnost trvala [s]
$A_D$…plocha lidského těla [m$^2$], vypočtena dle DuBoisova vztahu (1.14)

Z obrázku 38 je patrné, že sporttester Garmin Fenix 6X Pro měří metabolickou aktivitu s chybou menší než 0,3 met ve srovnání s přesnou hodnotou pro 11 z 15 probandů. U probanda číslo 4 hodinky nadhodnotily metabolickou aktivitu více než dvojnásobně, tato chyba však byla zřejmě způsobena nadměrně vysokou klidovou frekvencí, která se u daného probanda pohybovala až kolem 90 tep/minutu[41]. Proband se poté svěřil, že mají v rodině vrozené dispozice k vyšší tepové frekvenci, a dokonce členové rodiny navštěvují s tímto problémem lékaře. V této chvíli stojí za zmínku, že hodinky nebyly plně aklimatizovány, jelikož se jednalo o první měřenou činnost, a tak vyvstává možnost dalšího zkoumání či testování na téma aklimatizace hodinek – tedy zda by hodinky po aklimatizaci byly schopné metabolickou aktivitu měřit lépe i u probandů, kteří mají vyšší klidovou tepovou frekvenci.

Hodinky také nadhodnotily metabolickou aktivitu u probanda 11. V tomto případě to bylo zřejmě způsobeno nedodržením stanoveného chování před začátkem měření. Proband bohužel den před měřením ponocoval a ani se nevyhnul alkoholickým nápojům. Tyto skutečnosti pravděpodobně zapříčinily zvýšení klidové tepové frekvence, na základě čehož hodinky výrazněji nadhodnotily energetický výdej potažmo metabolickou aktivitu.

U zbývajících dvou probandů, u kterých došlo k nadhodnocení, konkrétně pro dobrovolníka číslo 13 a 15, nebylo zjištěno žádné pochybení z jejich strany. Nicméně u obou probandů byla zjištěna při měření poměrně vysoká tepová frekvence, a to kolem 80 tep/minutu. Takto vysoká klidová tepová frekvence mohla být způsobena navýšením o tzv. stresovou složku, která mohla být u této činnosti přítomna, a tak ovlivnit výsledek měření. Daná zvýšená klidová srdeční frekvence mohla být zapříčiněna u citlivějších jedinců např. stresem z prvního měření, případně se mohlo jednat o pro nás neznámé situace, které daného jedince vystresovaly před jeho účastí na měření. Opět tedy stojí za zmínku možnost aklimatizace hodinek na tuto situaci (měření



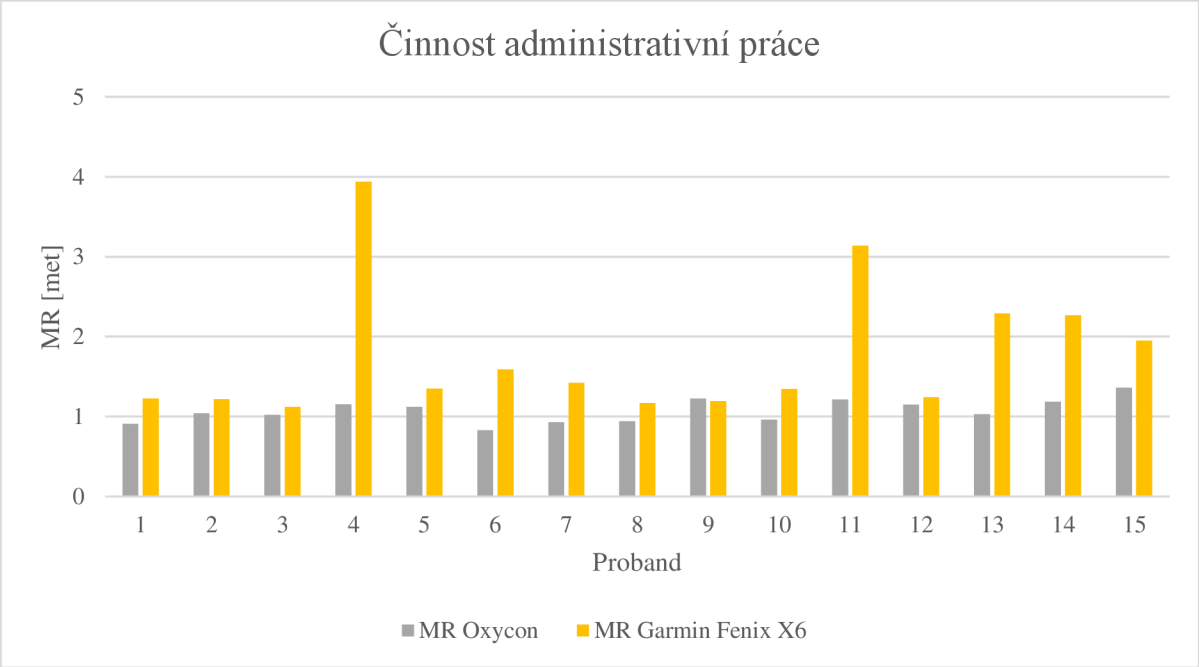

*Obrázek 39 Závislost odhadu na srdeční frekvenci, vlastní zpracování*

[41] Klidová tepová frekvence se u většiny probandů pohybovala kolem 55-60 tep/minutu.

metabolické aktivity u jedinců se zvýšenou stresovou složkou, hodinky jsou totiž schopny odhadovat míru stresu daného jedince), nicméně k tomu by bylo nutné poskytnou více párů měřených hodinek, a tak se opět otevírá prostor pro budoucí výzkum.

Stojí za zmínku povšimnutí poměrně silné závislosti odhadu metabolické aktivity na srdeční frekvenci v případě této klidové činnosti, viz obrázek 39 výše. Je patrné, že zařízení Oxycon Mobile měří MR pro činnost ležení konstantně pro všechny testované subjekty. Nepřesnost však vykazuje sporttester Garmin Fenix 6X Pro, a to pro subjekty které vykazovaly odchylku srdeční frekvence od průměrné. Pokud byla u subjektů naměřena vyšší srdeční frekvence, došlo k nadhodnocení metabolické aktivity, pokud naopak nižší tak mírnému podhodnocení, viz obrázek 39. Je zřejmé, že u takto zvolené činnosti hodinky nemohou plně využívat všech svých senzorů, proto zde právě vyvstává otázka, zdali by delší nošení přístroje, a tedy jeho aklimatizace pro daného probanda tyto individuální nepřesnosti v měření odbouralo.

Další měřenou aktivitou byla činnost administrativní práce v kanceláři v sedě. Během této činnosti probandi přepisovali předtištěný text na notebooku, přičemž jim byly dány instrukce, ať se pokusí přepsat textu co možná nejvíce. Výsledky na individuální úrovni jsou zobrazeny na obrázku 40.



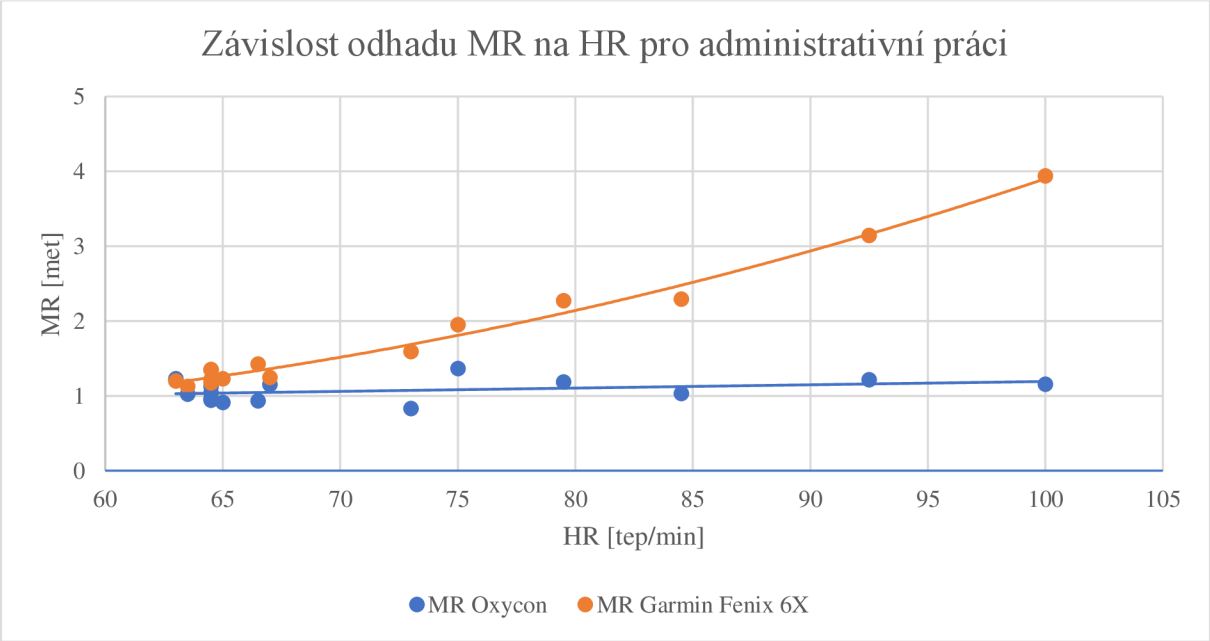

*Obrázek 40 Metabolická aktivita pro činnost administrativní práce, vlastní zpracování*

Z obrázku 40 je patrné, že hodinky Garmin Fenix 6X Pro opět měřily metabolickou aktivitu ve srovnání s nepřímou kalorimetrií měřenou přístrojem Oxycon Mobile s dobrou přesností na individuální úrovni pro dané probandy mimo již zmíněné probandy číslo 4, 11, 13 a 15. Nyní jsou patrné vyšší odchylky u převážné většiny probandů, nicméně ty mohou být způsobeny různou rychlostí přepisování textu. Během průběhu testu jsme si povšimli, že někteří probandi mají opřené o stůl pouze lokty, jiní i zápěstí, a tak dochází k různé intenzitě pohybu levé ruky, což zřejmě více ovlivňuje měření zátěže pomocí hodinek a zapříčiňuje vyšší rozdíly. Problém je také, že žádný proband nepřepsal stejnou délku textu, z čehož plyne že každý přepisoval jinak usilovně, což může do měření zanést také nepřesnost, protože výraznější pohyb levé ruky má

rozhodně větší vliv na měření s použitými hodinkami ve srovnání s měřením pomocí přístroje Oxycon Mobile.

Pro probanda číslo 4 se domníváme, že došlo k nadhodnocení metabolické aktivity predikované hodinkami ze stejného důvodu jako při činnosti ležení. Opět měl tento proband nadměrně vysokou tepovou frekvenci, a to průměrně za obě měření 100 tep/minutu. U ostatních se průměrně tepová frekvence pohybovala o 20 a 30 tepů níže. Právě tento rozdíl zřejmě nadhodnocení způsobil, jelikož hodinky nejen že nebyly ještě aklimatizovány, ale u této činnosti sporttester opět využíval k odhadu metabolické aktivity převážně informace o tepové frekvenci.

Proband číslo 11 bohužel nedodržel stanovená pravidla, a tak u něj došlo také k výraznému nadhodnocení. Opět zde je poměrně pěkně vidět silná závislost na tepové frekvenci u této činnosti, jelikož jeho průměrná tepová frekvence ze dvou měření byla 93 tep/minutu. Toto tvrzení lze potvrdit obrázkem 41. Z tohoto obrázku je zřejmé, že sporttester Garmin Fenix 6X Pro u této činnosti spíše nadhodnocoval energetický výdej právě v závislosti na vyšší srdeční frekvenci, přičemž chyba odhadu roste se zvyšující se srdeční frekvencí.



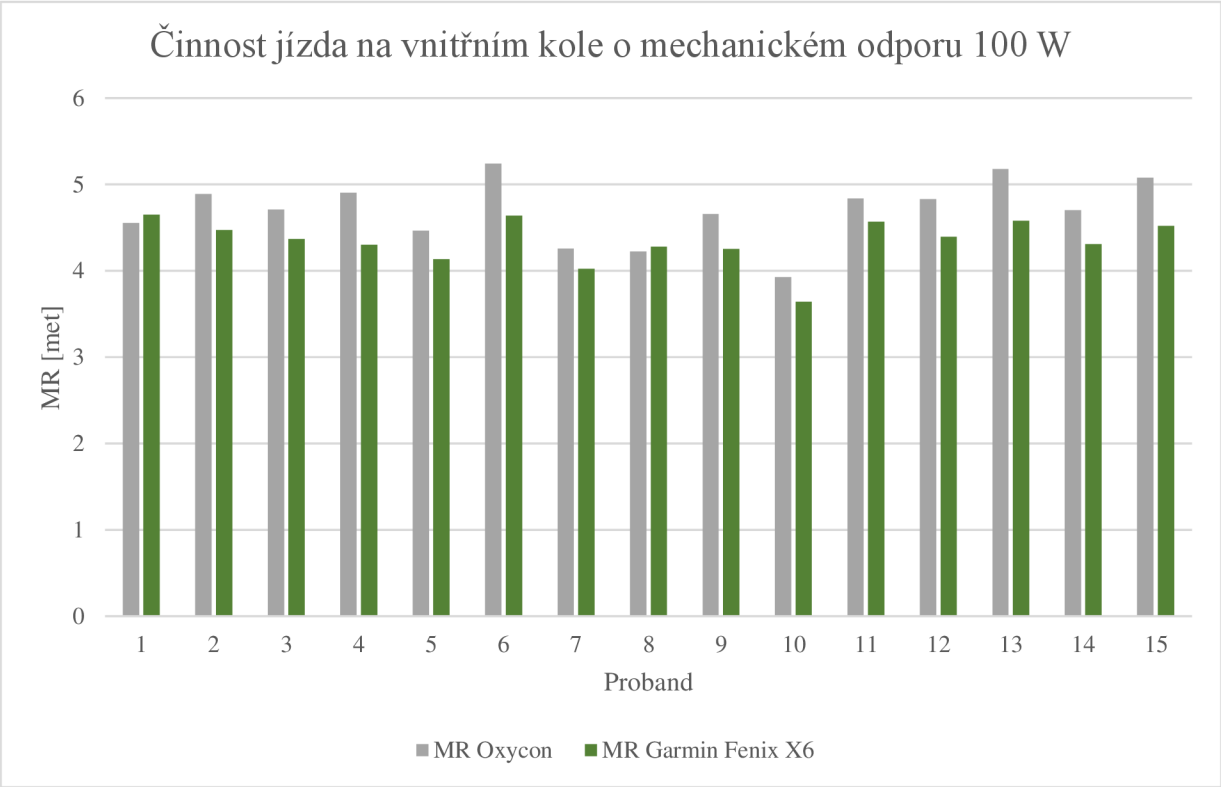

*Obrázek 41 Závislost odhadu MR na srdeční frekvenci pro administrativní práci, vlastní zpracování*

Zajímavé je také poukázat, že v prvním měření při totožné činnosti měl proband 11 tepovou frekvenci o 15 tep/minutu vyšší než při druhém. Tento trend se opakoval u více probandů, přičemž toto navýšení zřejmě opět způsobovala stresová složka srdeční frekvence, kdy v rámci prvního měření se citlivější probandi zřejmě více obávali toho, co budou muset v rámci experimentu reálně absolvovat.

Pro probandy 13 a 15 je vysvětlení zřejmě pouze ve vyšší srdeční frekvenci, kterou během činnosti administrativní práce v kanceláři vykazovali. Toto navýšení zřejmě bylo opět způsobeno stresem z dané aktivity. Opět by bylo zajímavé sledovat, jestli by delší nošení sporttesteru Garmin Fenix 6X Pro nepřesnost u těchto probandů odbouralo.

Posledním probandem, který vykazoval vyšší odchylku metabolické aktivity měřené a odhadované byl proband číslo 14. U tohoto dobrovolníka je třeba poukázat na to, že u činnosti ležení vykazoval poměrně dobrou schodu hodinek s přístrojem Oxycon Mobile. Po důkladnějším rozboru bylo však nalezeno, že proband zvládl při činnosti administrativní práce v kanceláři přepsat až o 1/3 více textu v porovnání s ostatními probandy. Z tohoto důvodu se můžeme domnívat, že docházelo k rychlejším pohybům zápěstí, což hodinky nezvládly postihnout, a proto metabolickou aktivitu nadhodnotily.

Na obrázku 42 jsou zobrazeny podrobné výsledky na individuální úrovni pro činnost jízda na vnitřním kole s regulovaným odporem 100 W. Před zahájením této fáze byly účastnici vyzváni, aby šlapali s co možná nejstálejší kadencí, kterou bylo možné si kontrolovat na spuštěném notebooku.



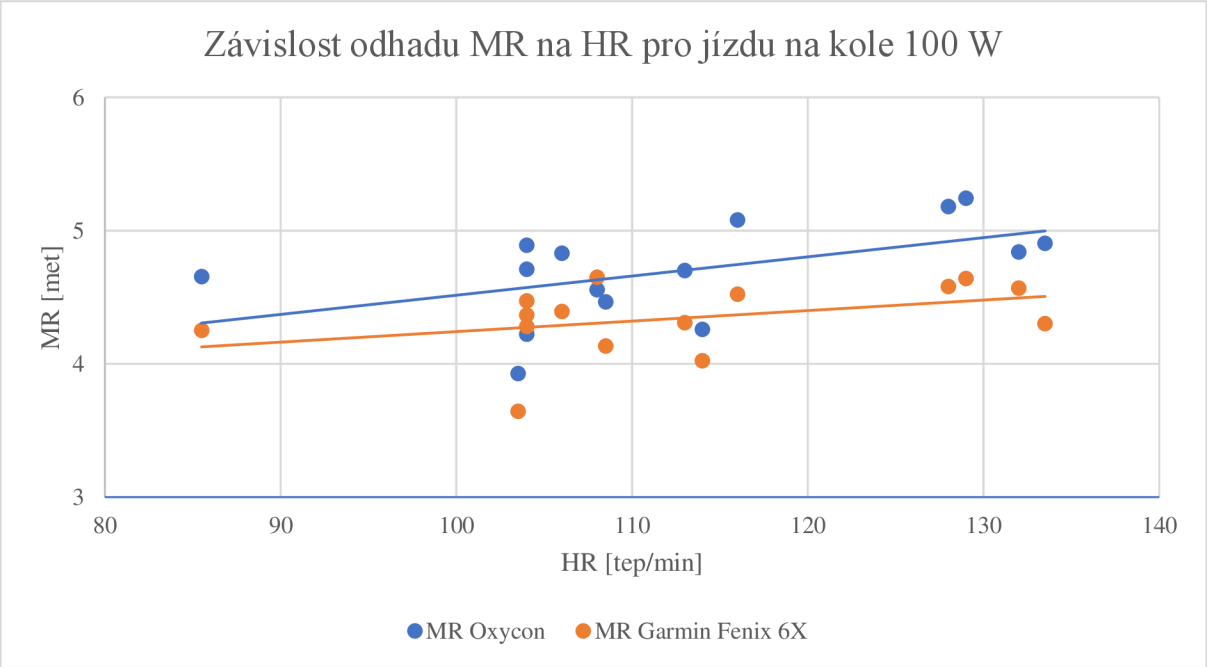

*Obrázek 42 Metabolická aktivita pro činnost jízda na kole s regulovaným odporem 100 W, vlastní zpracování*

Z obrázku 42 je patrné, že při měření metabolické aktivity pro činnost jízda na vnitřním kole s regulovaným odporem hodinky vykazovaly poměrně přesný odhad na individuální úrovni. U všech probandů, byl průměrný rozdíl za obě testování mezi měřenou hodnotou pomocí nepřímé kalorimetrie a sporttesteru Garmin Fenix 6X Pro menší než 0,6 met. Za zmínku stojí srovnatelnost přesnosti odhadu pro „problémové“ probandy, tedy pro ty, u kterých hodinky v případě předchozích činností metabolickou aktivitu výrazněji nadhodnotily.

Zvýšení přesnosti odhadu i u probandů, kteří vykazovali vyšší klidovou tepovou frekvenci si vysvětlujeme hned několika skutečnostmi. Nejprve stojí za zmínku proband číslo 4, který měl vyšší klidovou tepovou frekvenci o 20–30 tepů oproti většině ostatních probandů. Při činnosti jízda na kole o odporu 100 W měl opět vyšší tepovou frekvenci než ostatní probandi, a to srovnatelně o 20–30 tepů, nicméně i přesto hodinky dokázaly odhadnout metabolickou aktivitu se

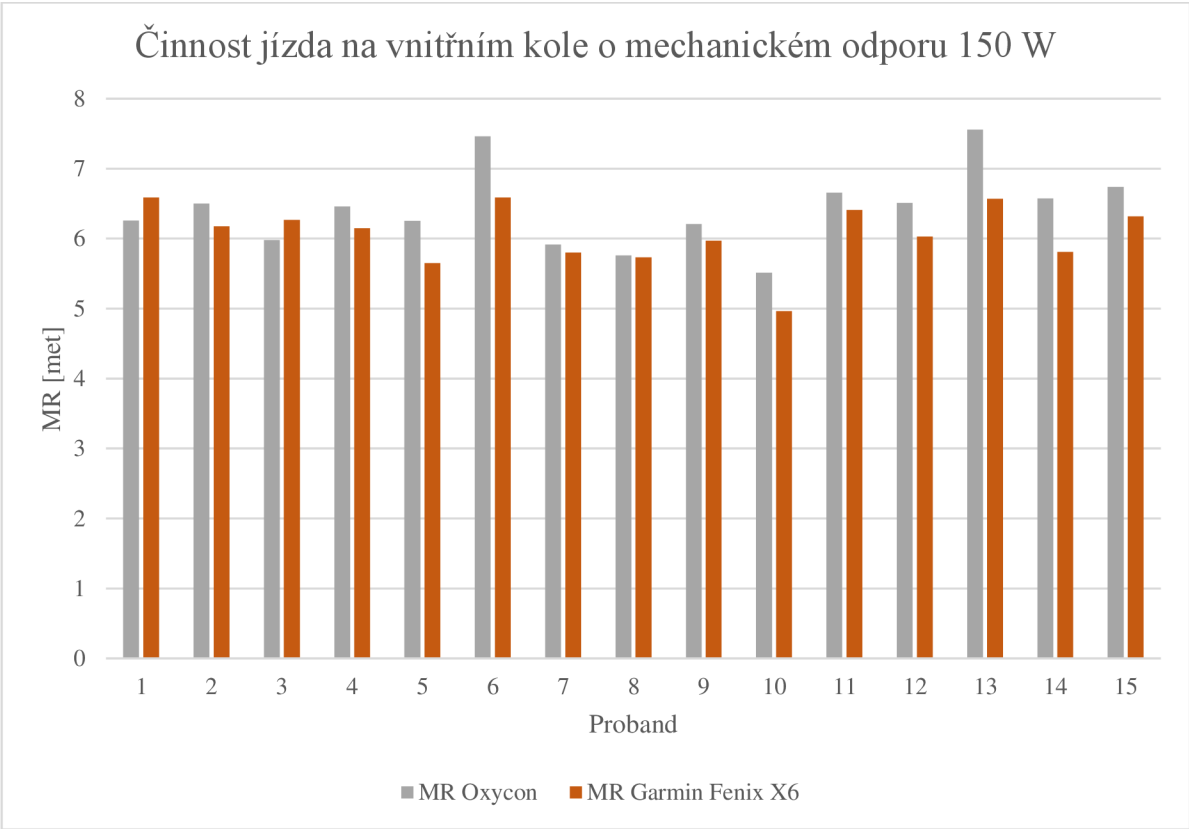
srovnatelnou přesností oproti ostatním probandům. Zapříčiněno je to zřejmě možností využití více senzorů, které zajistí lepší odhad, ale také aklimatizací přístroje, jelikož když šel proband měřit tuto činnost, tak už měl za sebou dvě měřené aktivity. Opět v této chvíli stojí za zmínku poukázat na možnost dalšího zkoumání a to konkrétně, jestli by sporttester dokázal přesně odhadovat metabolickou aktivitu u této činnosti pro takového probanda, kdyby předtím nevykonal již dvě činnosti, při kterých metabolickou aktivitu hodinky výrazněji nadhodnotily a během kterých se zřejmě alespoň částečně aklimatizovaly, potažmo jaký by byl v tomto odhadu rozdíl. Dále je také možné sledovat, že u probandů, u kterých hodinky při klidovějších aktivitách nadhodnocovaly metabolickou aktivitu dle našeho úsudku z důvodu přítomnosti stresové složky, dochází prakticky k vymizení této skutečnosti u aktivit o vyšší zátěži. Může to být způsobeno např. již zmíněným zapojením většího množství senzorů při dané akci, případně také vymizením stresové složky při této aktivitě z důvodu vyšší fyzické aktivity čili proband se více zaměřil na výkon a neměl tolik prostoru se soustředit na stres a nekomfort při měření jako při klidové akci.

Tvrzení, že pro činnost jízda na kole s regulovaným odporem 100 W odhad metabolické aktivity pomocí sporttesteru Garmin Fenix 6X Pro nezáleží tak silně na srdeční frekvenci, je podpořeno níže uvedeným obrázkem 43. Je patrné, že se zvyšující srdeční frekvencí dochází u této činnosti k zvýšení metabolické aktivity nicméně tento trend nárůstu sleduje jak Oxycon Mobile, tak hodinky Garmin Fenix 6X Pro.




*Obrázek 43 Závislost odhadu na srdeční frekvenci pro jízda na kole 100 W, vlastní zpracování*

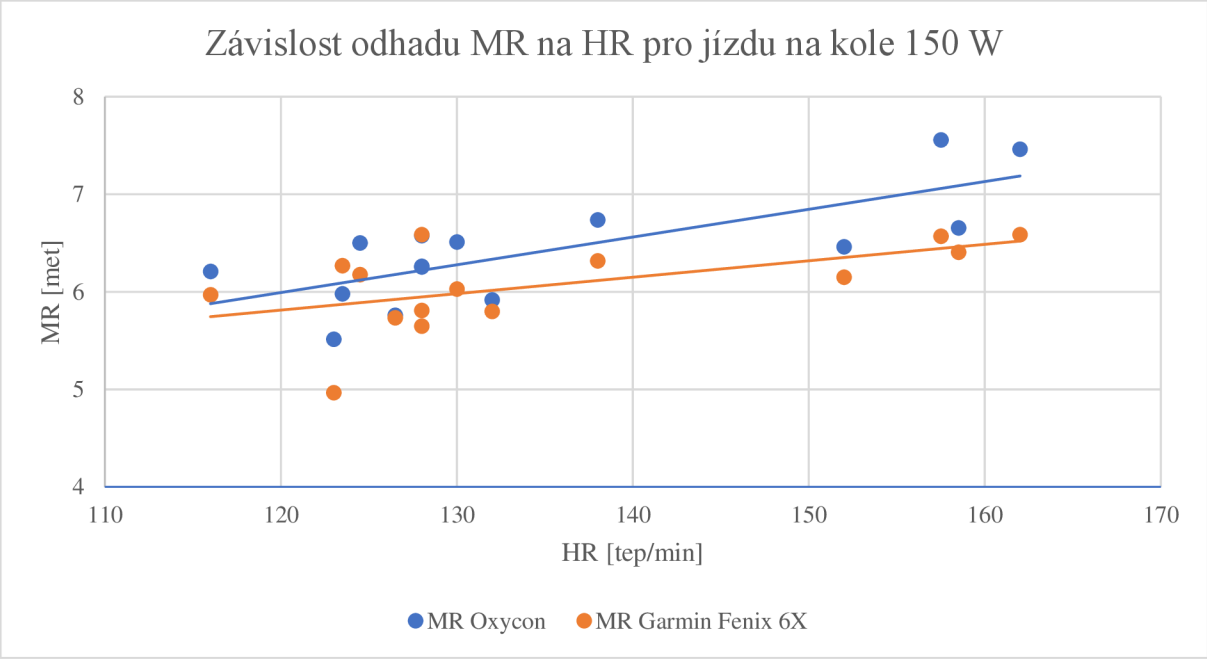
Poslední měřenou činností byla jízda na vnitřním kole o regulovaném odporu 150 W. Tomuto testování však předcházela odpočinková fáze, která trvala nejdéle 10 min, jejíž cílem bylo zklidnění probanda. Při stanovení délky odpočinku bylo vycházeno z výše uvedených validačních studií [57], [79]. Podrobné výsledky z této fáze měření jsou zobrazeny na obrázku 44.




*Obrázek 44 Metabolická aktivita jízda na vnitřním kole o odporu 150 W, vlastní zdroj*

Z obrázku 44 je patrné, že pro činnost jízda na vnitřním kole o regulovaném odporu 150 W vykazovaly hodinky poměrně přesných odhadů na individuální úrovni. U této činnosti již bylo důležité se zajímat o individuální výkon, jaký proband reálně šlape. Jelikož někteří probandi měli kolem 65 kg, byla to pro ně již značná zátěž. I z tohoto důvodu jsou výsledky zajímavější, jelikož hodinky vykazovaly přesný odhad, a to i když jeden proband měl reálnou metabolickou aktivitu 5,5 metu oproti jinému, který při totožném mechanickém odporu vykazoval metabolickou aktivitu 7,5 metu. Tyto rozdíly v individuální výši metabolické aktivity jsou způsobeny, jak je již zmíněno výše, rozdílnou váhou jednotlivých probandů, protože daný mechanický odpor byl nastaven nezávisle na váze probandů, a to na daných 100 a 150 W. Z tohoto důvodu pak u probandů s nižší váhou docházelo k vyšší individuální zátěži při přepočtu mechanické zátěže na jednotku váhy daných probandů. Daný fakt, avšak nijak negativně neovlivnil měření, protože naším cílen bylo porovnání mezi hodinkami a nepřímou kalorimetrií, nikoliv vliv individuálních charakteristik na výši metabolické zátěže u jednotlivých probandů.

Opět stojí za zmínku probandi, kteří měli vyšší klidovou tepovou frekvenci a sporttester nadhodnocoval jejich metabolickou aktivitu pro klidové činnosti, tak naopak v případě této činnosti vykazovaly hodinky pro ně přesný odhad. Závislost metabolické aktivity na srdeční frekvenci lze pozorovat na obrázku 45. Opět je patrné, že při této činnosti dochází ke shodnému trendu závislosti metabolické aktivity na srdeční frekvenci měřené pomocí nepřímé kalorimetrie a odhadované pomocí sporttesteru Garmin Fenix 6X Pro a nedocházelo tak k výraznějšímu nadhodnocení metabolické aktivity u probandů s vyšší srdeční frekvencí.



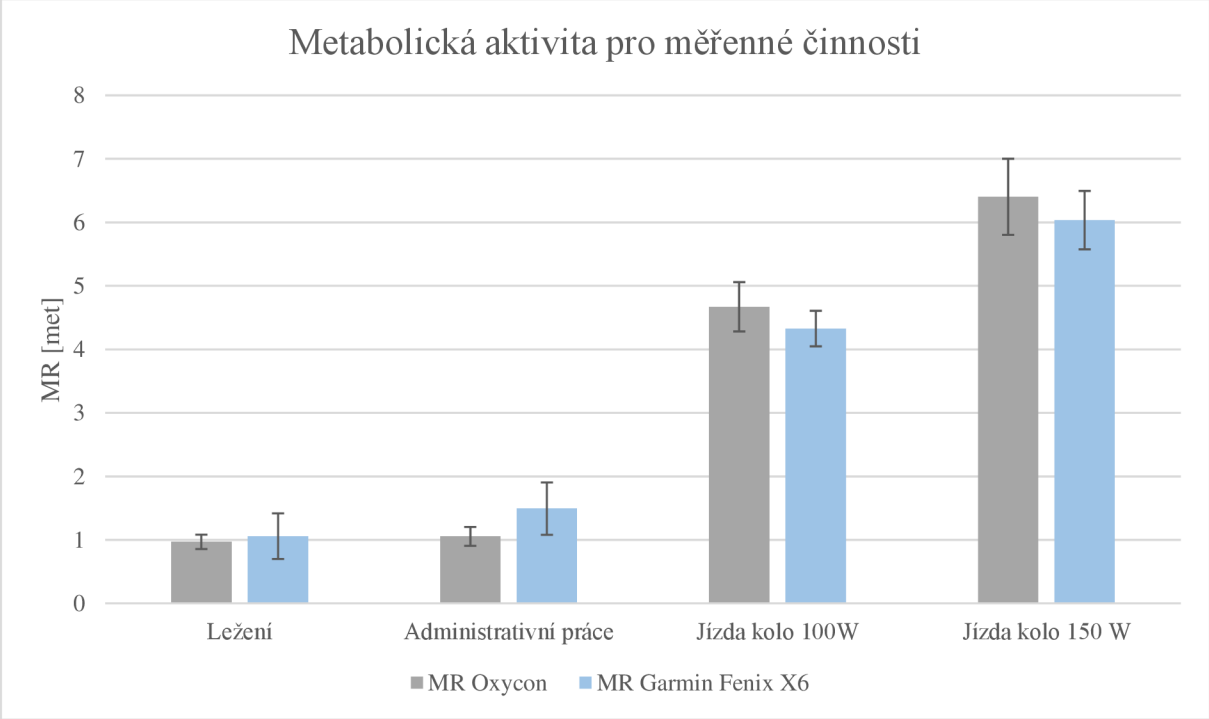

*Obrázek 45 Závislost odhadu MR na HR pro činnost jízda na kole s regulovaným odporem 150 W, vlastní zpracování*

Opět relativně velké odchylky dosahoval proband číslo 6, viz obrázek 44, který měl ale vyšší odchylku měřené a odhadované metabolické aktivity i v případě šlapání na kole s odporem 100 W. V tomto případě musíme poukázat na aklimatizaci přístroje, která by zřejmě tuto chybu v odhadu snížila.

## 8.2 Souhrnné výsledky a jejich diskuze

Dále bylo vytvořeno hodnocení na skupinové úrovni, které nám umožnilo také statistické vyhodnocení chyb z porovnání výsledků měření pomocí hodinek vůči Oxyconu Mobile. Toto vyhodnocení bylo učiněno bez probanda číslo 4, který byl vyřazen ze statického zpracování, a to z objektivních důvodů, konkrétně jelikož u něj byla zjištěna vrozená abnormalita vyšší klidové tepové frekvence. Druhým probandem, který byl vyřazen z objektivních důvodů byl proband číslo 11, který nedodržel životosprávu, a nejen že 24 hodin před začátkem měření požil alkoholické nápoje, ale dokonce si nedopřál ani kvalitní spánek, který nahradil požitím energetických nápojů.

Toto souhrnné vyhodnocení je zobrazeno níže na obrázku 46. Jedná se o zobrazení výsledků měření jako celku v porovnání s nepřímou kalorimetrií.




*Obrázek 46 Metabolická aktivita pro měřené činnosti, vlastní zdroj*

Z výše uvedeného obrázku 46 je patrné, že pro všechny činnosti měřil sporttester Garmin Fenix 6X Pro s dobrou přesností. Nejprve se zaměříme na skupinové vyhodnocení pro činnost ležení. V tomto případě stojí za povšimnutí velmi malá chybová úsečka pro zařízení Oxycon Mobile, čímž je poukázáno na skutečnost, že u této činnosti nejsou příliš velké rozdíly ve velikosti metabolické aktivity pro měřené subjekty v tomto výzkumu. Sporttester Garmin Fenix 6X Pro dosahoval poměrně příznivých výsledků, nicméně jsou v některých případech patrné velké individuální rozdíly, viz obrázek 38 (převážně probandi 13 a 15), kteří zvyšují velikost chybové úsečky[42].

Další vyhodnocovanou činností na skupinové úrovni byla administrativní práce. U této činnosti si můžeme povšimnou výraznějšího nadhodnocení metabolické aktivity pomocí sporttesteru

[42] Chybové úsečky jsou grafickým zobrazením směrodatných odchylek.

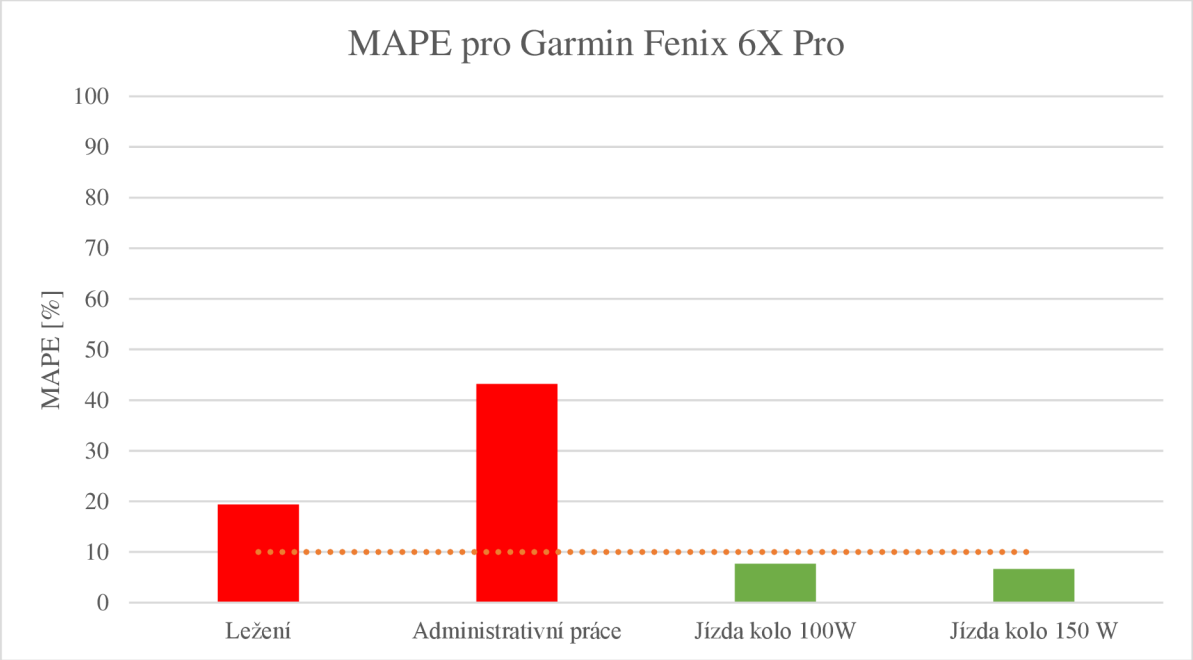
Garmin Fenix 6X Pro. Jelikož se jednalo však o činnost, u které se nejvíce projevuje osobnostní faktor, lze tento výsledek shledat za příznivý. Obecně chytré hodinky mají výrazný problém s odhadem metabolické aktivity u domácích činností, u kterých nelze postihnou stejnou intenzitu práce pro všechny měřené subjekty. Na tuto skutečnost bylo poukázáno již ve výše uvedené studii dle GILGEN-AMMANN a kol. [78], ve které chytré hodinky vykazovaly právě nejvyšší chybu pro domácí činnosti, tedy u činností, u kterých nelze postihnout totožnou intenzitu.

Pokud se blíže zaměříme na činnosti o nižší intenzitě, lze čerpat také z poznatků uvedených autory DÜKING a kol. [83]. V této studii vystupoval sporttester Garmin Fenix 5, což je předchůdce námi zkoušených hodinek. Můžeme si povšimnou poměrně velkých rozptylů, viz obrázek 30 pro činnosti o nízké intenzitě v tomto případě se jednalo o sezení a o velmi pomalou chůzi. Výsledky uvedené v této práci korespondují s výsledky této studie pro činnosti o nízké intenzitě. U činností o nízké intenzitě tak dochází k silné závislosti na individuálních variabilitách měřených subjektů.

Dále bylo přistoupeno ke skupinovému vyhodnocení činností o střední intenzitě, konkrétně se jednalo o jízdu na vnitřním kole o regulovaném mechanickém odporu 100 W a 150 W. V těchto případech je důvodné poukázat na konzistentnost celého měření, kdy sporttester Garmin Fenix 6X Pro dosahoval velmi malých chybových úseček. Ostatně z obrázku 46 je patrné, že sporttester vykazoval velmi malé odchylky od měřené hodnoty metabolické aktivity pomocí nepřímé kalorimetrie, což poukazuje na přesnost odhadu metabolické aktivity pro takto zvolené činnosti. Zajímavé je, že při obou činnostech docházelo k mírnému podhodnocení metabolické aktivity oproti měřené nepřímou kalorimetrií.

Přesností odhadu tohoto sporttesteru se zabývala komplexní studie uvedená výše dle LE a kol. [84]. V této studii se spíše zabývali přesností odhadu energetického výdeje při běhání (činnosti o střední intenzitě pohybu), zajímavostí však může být, že pro tyto činnosti sporttester Garmin Fenix 6X Pro energetický výdej nadhodnocoval. V našem konkrétním případě pro zvolené činnosti o střední intenzitě (jízda na kole) docházelo na druhou stranu k podhodnocení na skupinové úrovni.

Pro možnost statistického porovnání s ostatními studiemi vytvořenými na téma přesnosti odhadu metabolické aktivity pomocí sporttesterů se velmi často využívá MAPE[43]. Ve studii dle BOUDREAUX a kol. [73] byla stanovena jako kritérium pro validitu sporttesteru ve srovnání s nepřímou kalorimetrií hodnota MAPE <10 %, což je v souladu se studiemi dle LEE a kol [74] i NELSON a kol. [75]. Pro hodnocení sporttesteru Garmin Fenix 6X Pro v našem výzkumu jsme převzali hodnocení právě z těchto studií. Hodnocení validity sporttesteru pomocí MAPE je zobrazeno na níže uvedeném obrázku 47.




*Obrázek 47 MAPE pro Garmin Fenix 6X Pro, vlastní zpracování*

Na obrázku 47 je zobrazeno MAPE pro sporttester Garmin Fenix 6X Pro, přičemž červenou barvou je zobrazena střední absolutní procentuální chyba, která nesplňuje kritérium MAPE <10 % [73]. Je zřejmé, že toto kritérium nebylo splněno pro činnost ležení a administrativní práce v kanceláři. V případě ležení dosahovala MAPE až 20 % i přes objektivně vyřazené probandy číslo 4 a 11. Důležité je však poukázat na stresovou složku tepové frekvence, kterou hodinky zřejmě nedokázaly u všech probandů správně postihnout. Také takto vysoká MAPE pro tuto činnost byla nejspíše způsobena nedostatečnou aklimatizací sporttesteru Garmin Fenix 6X Pro.

Nejvyšší MAPE dosahovaly hodinky pro činnost administrativní práce, což koresponduje s analýzou podrobných výsledků uvedenou výše. V tomto případě dosáhla MAPE dokonce 43 %, ale možných důvodů v tomto případě bylo hned několik a blíže jsou popsány již výše. Za zmínku stojí sumář studií dle EVENSON a SPADE [80], který je také popsán výše. V tomto

[43] Jedná se o střední absolutní procentuální chybu daného sporttesteru vůči přesnému měřiči, v našem případě Oxycon Mobile. Pro tuto chybu je stanoven výpočet dle níže uvedené rovnice [97].

$$MAPE = \frac{100\%}{n}\sum_{t=1}^{n}\left|\frac{A_t - F_t}{A_t}\right|$$

$A_t$… hodnota MR měřená pomocí Oxycon Mobile
$F_t$…hodnota MR odhadovaná pomocí sporttesteru Garmin Fenix 6X Pro

sumáři je uvedeno grafické zobrazení, viz obrázek 29. Z tohoto obrázku je patrné, že sporttestery od společnosti Garmin vykazovaly MAPE pro běžné domácí činnosti kolem 20 %. Do této kategorie bychom mohli zařadit i činnost administrativní práci, která byla testována v této diplomové práci. Bohužel oproti výše uvedenému sumáři došlo ke zhoršení výsledků, ale v případě kategorie administrativní práce velmi záleží na individuálním tempu při práci a případném pohybu zápěstí, na kterém jsou umístěny hodinky.

Nejlépe dopadly činnosti jízda na vnitřním kole o regulovaném odporu 100 W a 150 W. Pro obě činnosti dosahovala MAPE méně než 10 %, tedy lze je považovat dle výše uvedeného kritéria za velmi přesné. Pokud se zaměříme na porovnání dvou činností mezi sebou shledáme nepatrně lepší výsledky reprezentovány nižší MAPE chybou v případě jízdy na kole o regulovaném odporu 150 W.

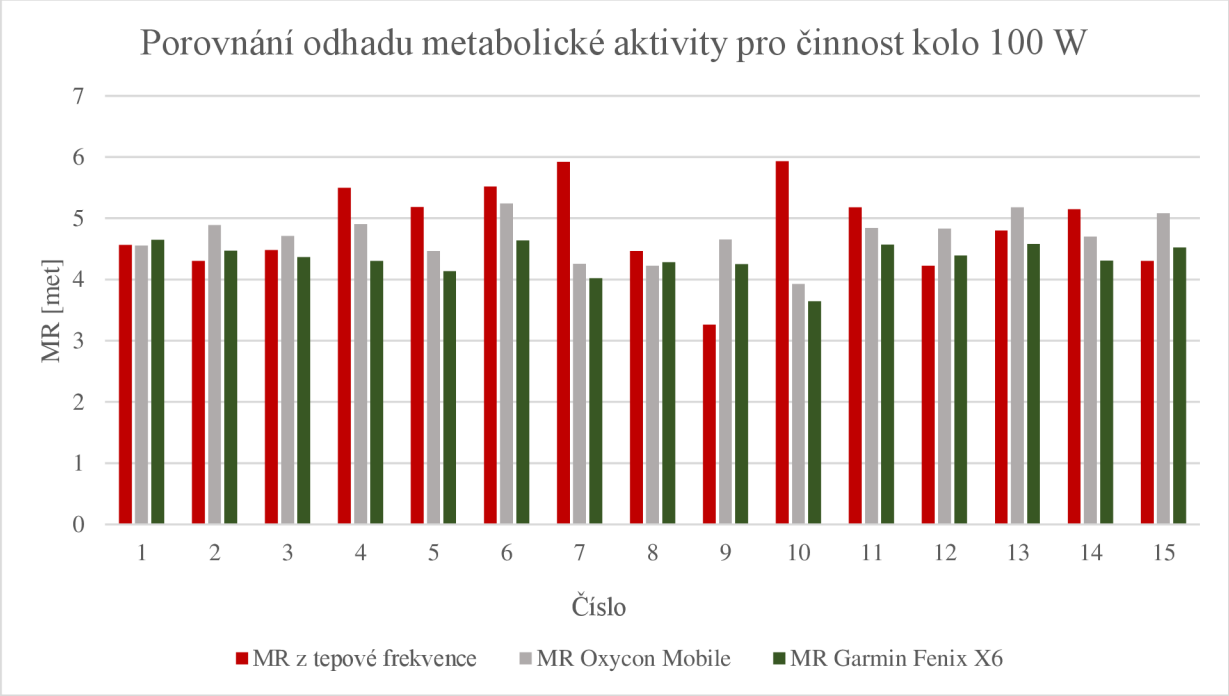
Pokud se podíváme opět na výsledky sumáře dle EVENSON a SPADE [80] pro jízdu na kole, shledáme, že dosahovala MAPE od 20–60 %. V našem případě bylo však použito vnitřní kolo a také propracovaný systém regulace odporu dle aplikace ROUVY. Nejen však z těchto důvodů sporttester Garmin Fenix 6X PRO dosahoval v této kategorii tak dobrých výsledků. Výše zmíněný sumář byl proveden k roku 2018, a tak je zřejmé, že technologický pokrok se tomuto sporttesteru nevyhnul a také proto byly naměřeny v naší studii takto dobré výsledky. Do budoucnosti by bylo z našeho pohledu vhodné se zaměřit na činnosti o nízké intenzitě, u kterých hodinky dosahovaly vyššího MAPE, či zda by proces aklimatizace tyto větší odchylky odstranil.

## 8.3 Metabolická aktivita vypočtená na základě HR

Tato práce byla zaměřena na validaci sporttesteru Garmin Fenix 6X Pro v porovnání s nepřímou kalorimetrií, která byla zastoupena zařízením Oxycon Mobile. Nicméně při podrobné rešerši k metodám měření byl nalezen také výpočet metabolické aktivity založen na využití měření tepové frekvence. Tato data byla k dispozici, jelikož sporttester Garmin Fenix 6X Pro během činností kontinuálně srdeční frekvenci měřil, a tak pro porovnání byl proveden výpočet metabolické aktivity na základě veřejného matematického popisu uvedeného *(6.9)* výše a poté porovnána velikost chyby mezi metabolickou aktivitou vypočtenou ze srdeční frekvence (měřena hodinkami Garmin) a metabolickou aktivitou změřenou pomocí nepřímé kalorimetrie. Pro měření srdeční frekvence dosahují sporttestery nepoměrně lepších výsledků než při měření (odhadu) metabolické aktivity, proto je možné využít měřenou tepovou frekvenci tímto přístrojem do výpočtu. Tvrzení, že chytré hodinky dovedou měřit HR s dobrou přesností, potvrzuje mnoho validačních studií např. studie dle REDDY a kol. [77].

Nejprve je nutné popsat metodiku výpočtu. Teoretické základy byly popsány výše, viz kapitola „6.1.1 Vztah mezi HR a MR“, přičemž výpočet vychází z normy ČSN ISO 8996 [31], dále byly použity poznatky ze studie dle MALCHAIRE a kol. [67]. Ve výpočtu bylo provedeno několik zjednodušení, prvním bylo, že za klidovou tepovou frekvenci jsme ve výpočtu uvažovali frekvenci naměřenou sporttesterem Garmin Fenix 6X Pro při činnosti ležení. Za základní klidovou metabolickou aktivitu byla dosazena hodnota vypočtená dle rovnice MIFFLIN a kol. [22], přepočtena na plochu lidského těla.

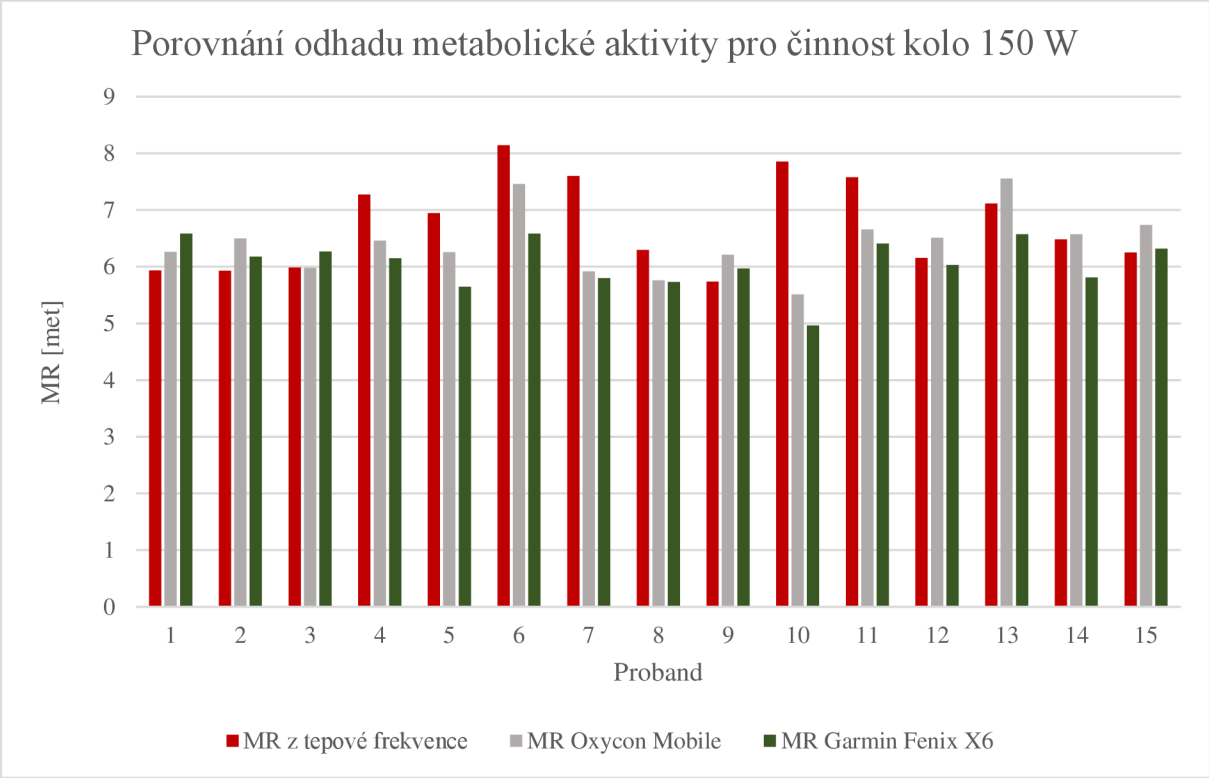
Z důvodu uvažování klidové srdeční frekvence naměřené při činnosti ležení nebylo výpočtově reálné vypočíst metabolickou aktivitu pro činnosti o nízké intenzitě. Výpočet byl tedy proveden pouze pro činnost jízda na kole o regulovaném odporu 100 W a 150 W. Na obrázku 48 je zobrazeno porovnání na individuální úrovni.




*Obrázek 48 Porovnání měřené metabolické aktivity a odhadované pomocí Garmin Fenix 6X a matematických rovnic využívajících tepovou frekvenci, vlastní zpracování*

Z tohoto obrázku je patrné, že při odhadu ze srdeční frekvence dochází k výraznějším individuálním odchylkám, a to na obě strany spektra, tedy že metabolická aktivita může být výrazněji nadhodnocena např. až o 2 mety, tak i podhodnocena. V tomto obrázku je viditelné, že pro probanda 1 je odhad pouze ze srdeční frekvence velmi přesný, na druhou stranu, když si vezmeme probanda 10, vidíme, že se odhad výrazně mýlil. Z tohoto důvodu je zřejmé, že tento odhad není svou přesností srovnatelný s odhadem ze sporttesteru na individuální úrovni.

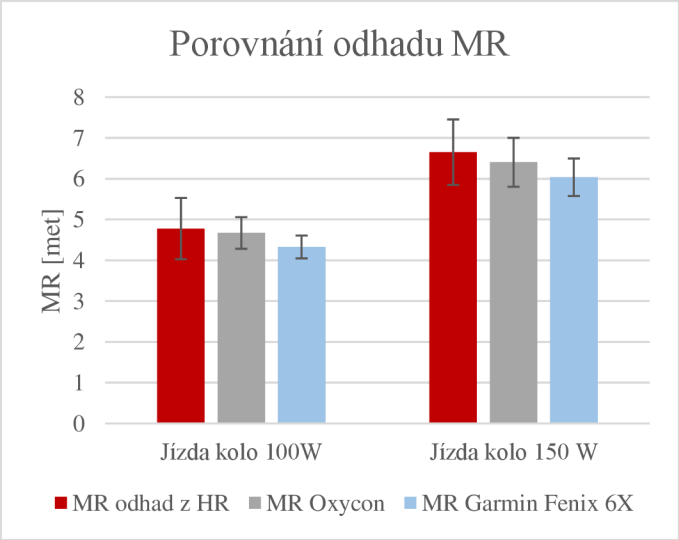
Dále byl výpočet proveden pro činnost jízda na kole o regulovaném odporu 150 W. Porovnání výsledků na individuální úrovni je zobrazeno na níže uvedeném obrázku 49. Z obrázku je patrné, že při navýšení zátěže došlo zřejmě k mírnému zlepšení odhadu metabolické aktivity ze srdeční frekvence. Může to být způsobeno tím, že při činnostech o středních a vyšších intenzitách se méně projevují individuální rozdíly v srdeční frekvenci. Je důvodné poukázat, že se téměř zrcadlí nepřesnosti odhadu ze srdeční frekvence pro jízdu na kole 100 W a 150 W, tzn. když špatně fungovala tato metodika výpočtu pro jedince při 100 W, s velkou pravděpodobností nebude přesně výpočet fungovat ani při činnosti o vyšší intenzitě. Na druhou stranu však, když se zaměříme na probanda 1, tak při 100 W byl odhad z tepové frekvence poměrně přesný, při 150 W došlo k mírnému podhodnocení metabolické aktivity.




*Obrázek 49 Porovnání metabolické aktivity pro činnost jízda na kole 150 W, vlastní zpracování*

Zajímavostí může být, že neplatí pravidlo, že když sporttester metabolickou aktivitu podhodnotil, tak výpočet ze srdeční frekvence ji podhodnotí též. Pokud se podíváme např. na probandy 4,5 a 6, zjistíme, že skutečná metabolická aktivita měřená pomocí nepřímé kalorimetrie se pohybuje téměř v polovině hodnot odhadovaných. Toto zjištění je zajímavé právě z důvodu, že vstupem do matematického výpočtu i sporttesteru byla stejná tepová frekvence, ale oba přístupy vytvořily velmi odlišný výsledek, což naznačuje, že sporttester Garmin využívá k odhadu metabolické aktivity i další hodnoty mimo srdeční frekvenci.

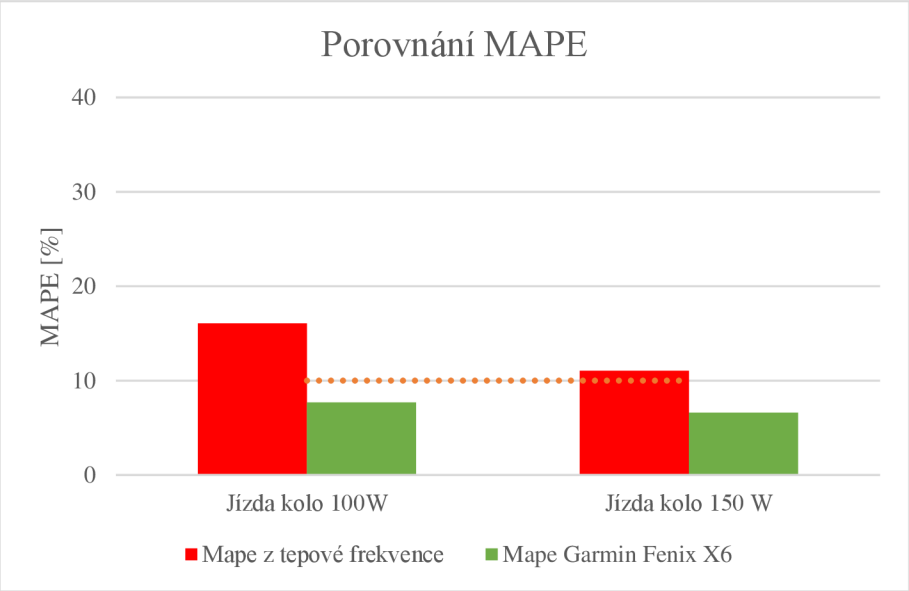
Dále bylo vytvořeno hodnocení na skupinové úrovni, opět pro činnosti jízda na kole o odporu 100 W a 150 W. Toto hodnocení je zobrazeno na obrázku 50. Z obrázku je zřejmé, že právě vyšší individuální rozdíly v odhadu metabolické aktivity způsobily zvýšení chybových úseček, a to pro obě činnosti. Ze zobrazení plyne, že odhad na základě tepové frekvence změřené pomocí sporttesteru Garmin Fenix 6X Pro s využitím veřejných matematických rovnic více reflektuje individuální rozdíly v tepových frekvencích než odhad metabolické aktivity přímo ze sporttesteru Garmin Fenix 6X Pro.




*Obrázek 50 Vyhodnocení metabolické aktivity na skupinové úrovni, vlastní pracování*

Nicméně tento rozdíl není rozhodně propastný. Je vidět, že použitá metodika k odhadu ze srdeční frekvence vykazuje poměrně dobré výsledky. Možná právě námi zavedené předpoklady[44] pomohly k individualizaci a zpřesnění odhadu metabolické aktivity pomocí těchto rovnic. Nespornou nevýhodou však je, že tento výpočet lze aplikovat pouze pro aktivity o střední až vysoké intenzitě, jelikož matematické rovnice jsou sestaveny tak, že dosazování nízkých srdečních frekvencí postrádá smysl.

Pro potvrzení domněnek o přesnosti je níže uveden graf s MAPE, tedy střední procentuální absolutní chybou. Na obrázku 51 je tedy zobrazeno MAPE vypočtené pro metabolickou aktivitu vypočtenou matematickými rovnicemi uvedenými výše a metabolickou aktivitu odhadnutou přímo ze sporttesteru Garmin Fenix 6X Pro (všechny hodnoty jsou porovnány s výsledky z nepřímé kalorimetrie).




*Obrázek 51 Porovnání MAPE pro sporttester a odhad ze srdeční frekvence, vlastní zpracování*

Z obrázku 51 je patrné, že MAPE sporttesteru Garmin Fenix 6X Pro pro tyto dvě činnosti je <10%, tedy splňuje kritérium přesnosti definované dle BOUDREAUX a kol. [73] a MAPE je tedy zobrazena zeleně. V případě vypočtené metabolické aktivity z predikčních rovnic výše uvedených, do nichž vstupem byla HR změřená stejným sporttesterem, byla hodnota MAPE vyšší než 10 %, z tohoto důvodu je zobrazena červeně. Nicméně pro činnost jízda na kole o odporu 150 W tento odhad s MAPE 11 % atakoval hranici 10 %. Je zde patrný trend, že menší MAPE je vykazováno u činnosti jízda na kole 150 W, a to v obou případech.

Sporttester Garmin Fenix 6X Pro je špičkovým sportovním zařízením, bylo tedy předpokládáno, že využívá pro odhad metabolické aktivity komplexnějších predikčních vzorců. Bylo by tedy zajímavé vytvořit výše uvedené porovnání sporttesteru s veřejnými predikčními rovnicemi, které jsou založeny na empiricky vypočtených hodnotách a měření pouze tepové frekvence. Je nutné zdůraznit, že do predikčních rovnic byla uvažována měřená hodnota srdeční

[44] Ve výpočtu byla uvažována klidová tepová frekvence měřená pomocí sporttesteru pro každý subjekt při činnosti ležení. Došlo tedy k individualizaci daných rovnic pro každý subjekt. Za klidovou metabolickou aktivitu byla uvažována hodnota vypočtena dle rovnice *(2.4)*, opět pro každý subjekt.

frekvence ze sporttesteru, tedy vstupní hodnota srdeční frekvence byly totožná jak pro odhad MR z predikčních rovnic, tak pomocí sporttesteru. Z porovnání na skupinové úrovni, viz obrázek 50, je patrné, že s využitím predikčních rovnic dochází k silnější závislosti na variabilitě srdeční frekvence měřených subjektů. Predikční komplexní model, který využívají hodinky, se snaží korigovat tyto individuality způsobené variabilitou srdeční frekvence, což je reprezentováno menší směrodatnou odchylkou a větší přesností odhadu pro činnost jízda na kole o regulovaném odporu 100 W a 150 W.

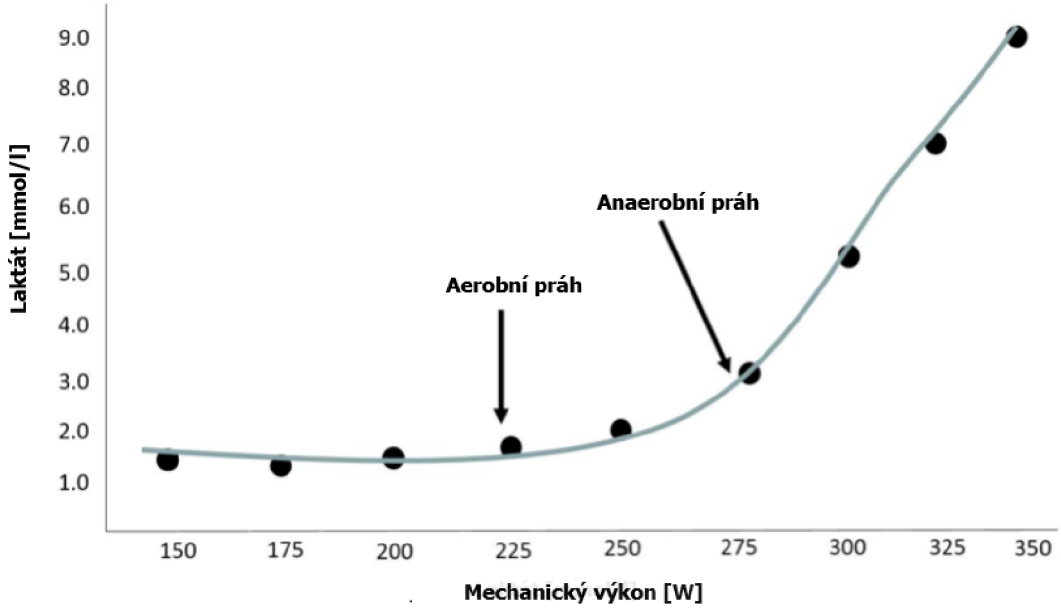
Z obrázku 51 také vyplývá, že sporttester Garmin Fenix 6X Pro dosahuje nižší MAPE ve srovnání s predikčními rovnicemi založenými na měření srdeční frekvence, tedy že tento sporttester vyhodnocuje metabolickou aktivitu přesněji. Tímto je potvrzen předpoklad, že hodinky, využívají komplexních predikčních modelů, které odhadují metabolickou aktivitu pro zvolené činnosti přesněji než predikční rovnice založené pouze na měření srdeční frekvence. Tato skutečnost poukazuje na možnosti nových výzkumů ohledně dokonalosti predikčních modelů odhadu metabolické aktivity pomocí sporttesterů a na fakt, že tato oblast vývoje má poměrně zajímavou budoucí perspektivu.

## 8.4 Testy o vysoké intenzitě

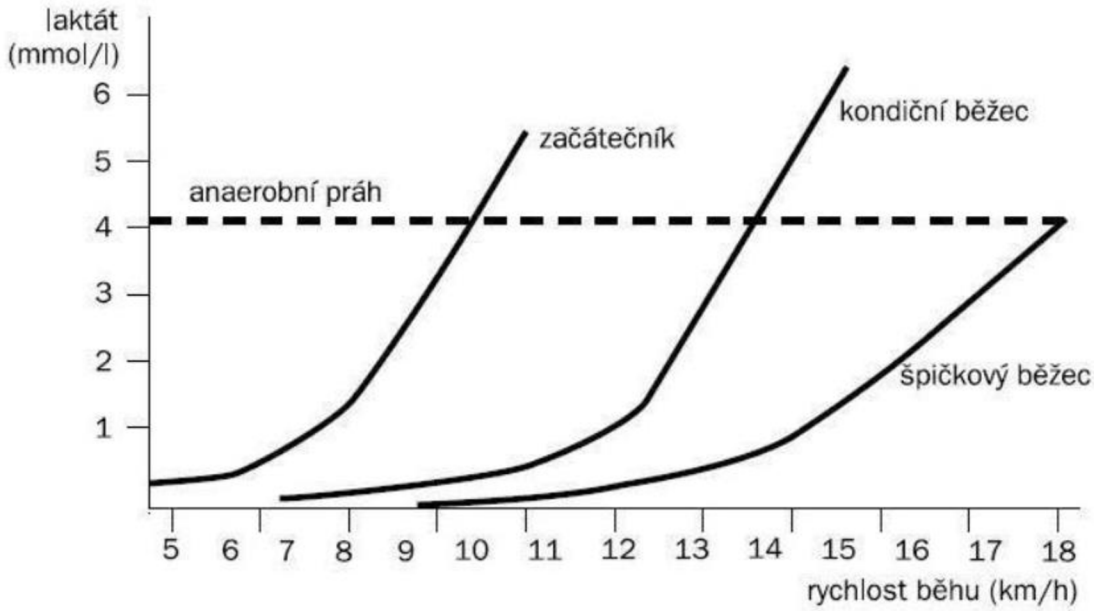
Výše zmíněné testování se zabývalo validací sporttesteru Garmin Fenix 6X Pro pro činnosti o lehké a střední intenzitě. Nicméně v průběhu testování vyvstala myšlenka, jak přesně by dokázaly chytré hodinky predikovat metabolickou aktivitu pro činnosti o vysoké intenzitě, tedy pro činnosti, u kterých je zapojen anaerobní metabolismus.

Bylo zřejmé, že testování činností o vysoké intenzitě nemůže být provedeno na testovacím souboru, který byl zvolen pro činnosti o lehké až střední intenzitě. Takové měření by se mělo již podrobit etické komisi a také by u těchto testů měl být přítomný lékař. Z těchto důvodu jsme testování provedli pouze pro dva probandy, kteří jsou sportovně založení a s takovým typem testu výslovně souhlasili. Byli předem důsledně poučeni a dělali test ze své vlastní vůle, jelikož je samotné zajímala jejich fyzická výkonnost.

Nejprve bylo nutné však sestavit samotný test tak, aby bylo zaručeno, že bude zapojen anaerobní metabolismus. Když se tvoří zátěžový test v medicínském prostředí, je v jeho průběhu sledována hladina laktátu v krvi, která indikuje, v jakém výkonnostním pásmu se jedinec nachází. Existuje tzv. aerobní a anaerobní práh, který je závislý právě na hladině laktátu v krvi. Pokud zabředneme ještě dále do fyziologických aspektů tréninku lze zobrazit tzv. laktátovou křivku zobrazenou na obrázku 52 [90].




*Obrázek 53 Laktátová křivka, upraveno z [90]*



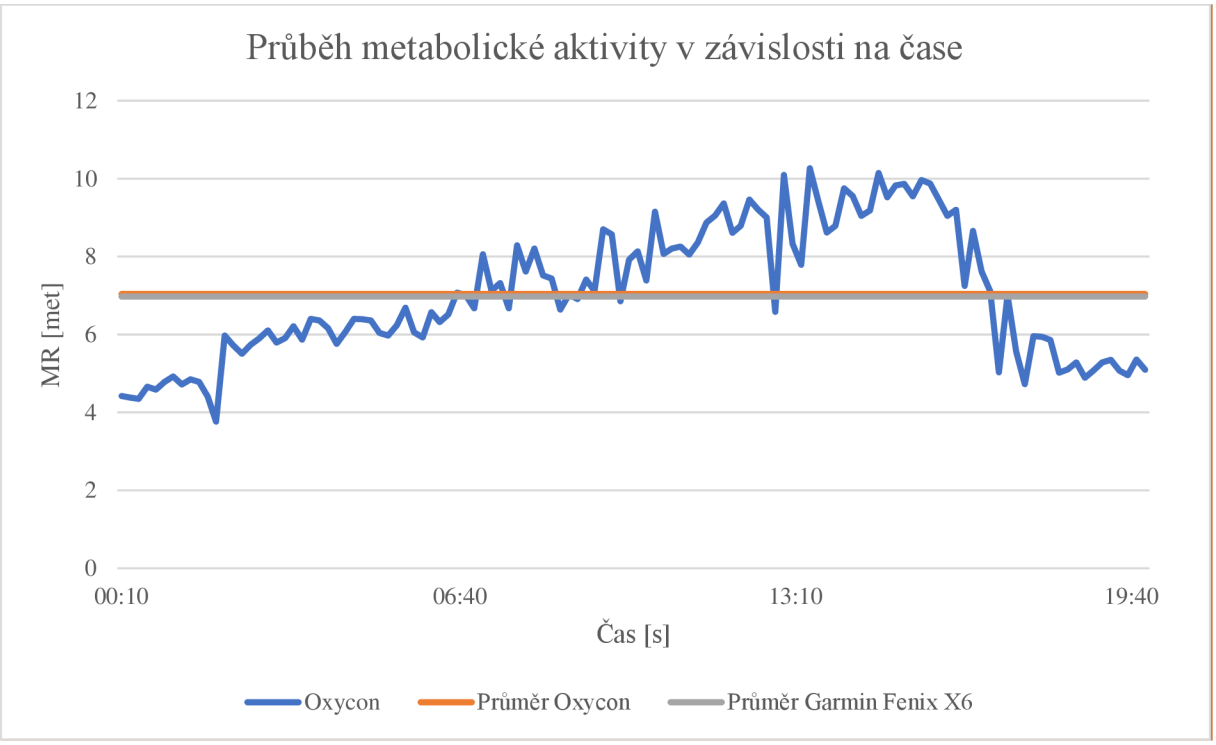

*Obrázek 52 Anaerobní práh, zdroj [89]*

Z obrázku 52 je patrné, že aerobní práh se pohybuje u zdravé populace mezi 18–30 lety při cca 2 mmol/l [90]. Nicméně pro naše měření je důležitější práh anaerobní. Dle literárních pramenů existují tři definice pro tento práh, a to podle toho na základě čeho je práh stanoven, jestli srdeční frekvence, koncentrace laktátu v krvi nebo na základě výdechových plynů. Z obrázku výše je patrné, že anaerobní práh dle koncentrace laktátu v krvi se pohybuje kolem 4 mmol/l. Je vidět, že mezi těmito výkonnostními prahy existuje přechodová oblast, během které již může být anaerobní metabolismus v menší míře zapojen. Důležité je poznamenat, že v případě detekce těchto prahů z množství kyseliny mléčné (laktátu) v krvi nezávisí na kondici daného jedince, jen jedinci o lepší fyzické kondici dosáhnou této úrovně laktátu v krvi při vyšším zatížení. Pěkně je tento vliv kondice jedince demonstrován na obrázku 53 [91].

Z výše uvedeného popisu je zřejmé, že problematika zapojení anaerobního metabolismu a stanovení anaerobního prahu je velmi rozsáhlá. Existuje více způsobu stanovení a podrobně se touto problematikou zabývá sportovní medicína. Pro naše účely bylo nutné definovat přibližnou pozici anaerobního prahu na základě tepové frekvence, jelikož nebylo možné měřit koncentraci kyseliny mléčné v krvi. Dle autorů literárního pramene LEHNERT a kol. [88] se nachází anaerobní práh u osob mezi 18–30 rokem věku v rozmezí 170 – 180 tep/minutu. Této podmínky jsme se při sestavení testu snažili dosáhnout.

Pro prvního probada byl test sestaven z jízdy na vnitřním kole o regulovaném proměnném odporu. Nejprve se jednalo o 2 minutovou fázi při 96 W, dále 4 min při 144 W, následovala fáze 4 min při 176 W, poté bylo odpor zvýšen na 208 W na 4 min a nejvyšší zatížení bylo 2 min při 240 W. Celý test byl zakončen vyjetím při 96 W, které trvalo 4 minuty. Celkový test tedy trval 20 minut, přičemž okolní teplota během měření byla 21 °C a relativní vlhkost 23 %.

Podrobné výsledky jsou zobrazeny na obrázku 54. Jedná se o zobrazení průběhu metabolické aktivity v závislosti na čase a její průměrné hodnoty (Oxycon Mobile) včetně hodnoty vypočtené z odhadovaného energetického výdeje pomocí chytrých hodinek. Z obrázku je patrná náběhová fáze dýchání, která kopíruje nárůst srdeční frekvence. Zajímavé je však porovnání průměrné hodnoty metabolické aktivity, která byla prakticky totožná pro měřenou hodnotu pomocí Oxycon Mobile a odhadovanou pomocí sporttesteru Garmin Fenix 6X Pro.

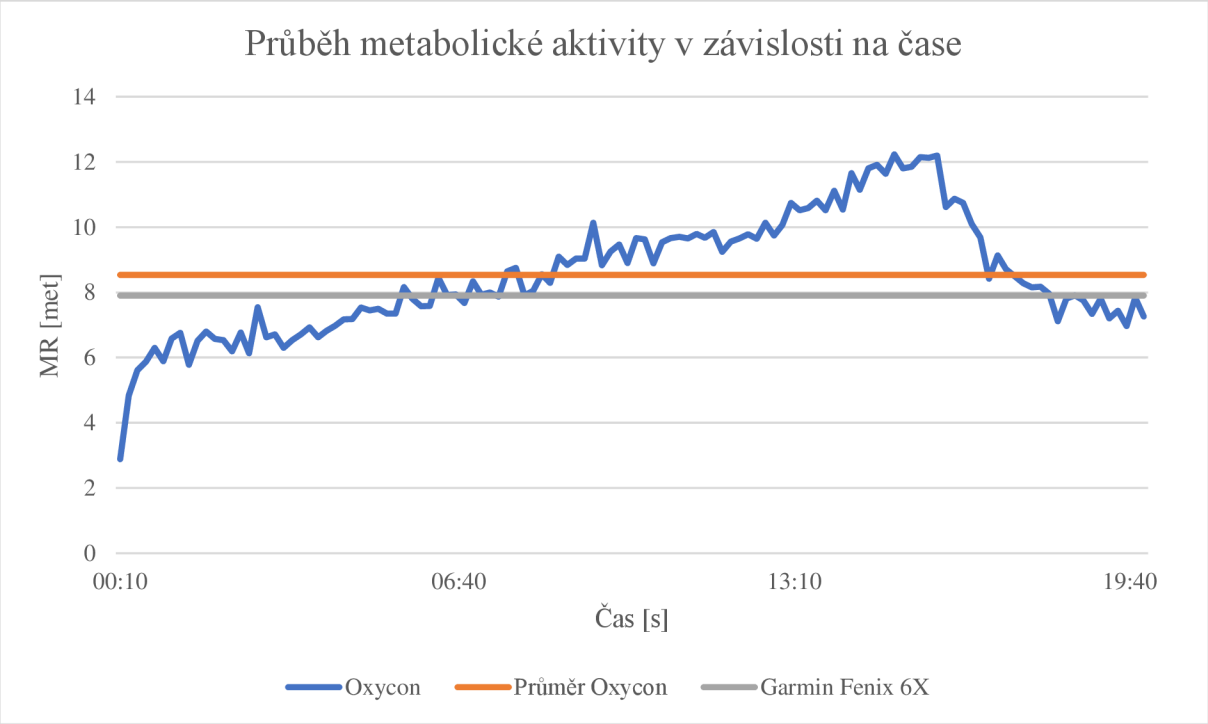



*Obrázek 54 Průběh metabolické aktivity v závislosti na čase, vlastní zpracování*

Tento výsledek byl poměrně nečekaný, nicméně je důležité zmínit, že proband, který absolvoval tento test, nedosáhl zřejmě anaerobního prahu, nicméně se nacházel v přechodové fázi, tudíž lze předpokládat, že byl zapojen alespoň částečně anaerobní metabolismus. Tento proband také sporttester Garmin Fenix 6X Pro vlastní a poskytl ho pro měření, z čehož lze usoudit, že sporttester byl plně aklimatizován na jeho fyzické parametry.

Při měření probanda číslo 2 byl navržen test s o něco vyšší obtížností, aby bylo anaerobního prahu dosaženo. Důležité je zmínit, že tento proband je bývalým závodním cyklistou a cyklistice se alespoň na rekreační úrovni věnuje dodnes. Zátěžový test pro tohoto probanda byl tedy sestaven následovně, nejprve 4 minuty zahřívací fáze při 140 W, následova 4 minuty fáze jízdy při 180 W, dále 4 minuty při 220W, test pokračoval 2 minutovou fází při 260 W a nejtěžší fází byla 2 minuty při 300 W. Následovalo 4 minutové vyjetí při 140 W pro lepší regeneraci tréninkem poškozeného svalstva.

Výsledky z tohoto testu pro tohoto dobrovolníka jsou zobrazeny na obrázku 55. Na obrázku je zobrazen průběh metabolické aktivity v závislosti na čase v případě přístoje Oxycon Mobile, dále průměrná hodnota MR z Oxycon Mobile, která činila 8,5 met a vypočtená hodnota z energetického výdeje, který byl odhadnut pomocí sporttesteru Garmin Fenix 6X PRO, která byla 7,9 metu. Jedná se opět o vyhodnocení na individuální úrovni. Pro tohoto probanda však hodinky nebyly aklimatizovány, pouze byly nastaveny tělesné parametry testovaného subjektu.




*Obrázek 55 Průběh metabolické aktivity na čase, vlastní zpracování*

Z obrázku 55 je dobře patrná náběhová fáze kdy docházelo k postupnému zvyšování nejen srdeční frekvence, ale i exspirovaného kysličníku uhličitého. U tohoto probanda byla maximální tepová frekvence během testu 182 tep/min, což indikuje, že jsme dosáhli anaerobního prahu, a tedy při této činnosti byl zapojen anaerobní metabolismus. Právě z toho důvodu je přesnost sporttesteru velmi oslnivá. Nicméně nelze si vykládat závěr pouze z měření dvou probandů, ale pro tyto dva probandy vykazovaly hodinky velmi dobré výsledky.

Na místě je zmínit potenciál chytrých technologií v této oblasti, kdy pro potvrzení těchto teorií o přesnosti sporttesteru pro činnosti a vysoké intenzitě by bylo nutné dalších validačních studií učiněných na tohle téma. Otevírá se zde tak možnost pro budoucí výzkum, který by chytré technologie v této oblasti mohl validovat. Jelikož jde technologický vývoj dopředu mílovými kroky, s čímž je spojeno právě zdokonalování senzorů či výpočetních modelů, je na místě poukázat právě na dynamiku potenciálu výzkumu v této oblasti.

# 9 Závěr

Hlavním cílem diplomové práce bylo validovat komerčně dostupné chytré hodinky vůči nepřímé kalorimetrii. Konkrétně byl na základě rešerše uvedené v bakalářské práci autora vybrán sporttester Garmin Fenix 6X Pro. Nepřímou kalorimetrii reprezentoval přístroj Oxycon Mobile, což je medicínské zařízení, které bylo zapůjčeno ze SÚJCHBO[45].

Na základě rešerše validačních studií byl vytvořen testovací protokol, pomocí kterého byl sporttester validován. Testování se zúčastnilo 15 probandů, nicméně dva museli být z výše uvedených objektivních důvodů vyloučeni. Testovanými činnostmi bylo: ležení, administrativní práce a jízda na kole s regulovaným mechanickým odporem ve výši 100 W a 150 W pomocí aplikace ROUVY.

Vyhodnocení výsledků pro jednotlivé aktivity lze rozdělit na dvě skupiny, a to na aktivity o nižší (ležení, administrativní práce) a střední zátěži (jízda na kole). Pro aktivity o nižší intenzitě sporttester Garmin bohužel nedosahoval potřebné přesnosti v predikci metabolické aktivity, tj. MAPE byla vyšší než 10 %. U obou těchto činností byla shledána poměrně silná závislost odhadu metabolické aktivity na srdeční frekvenci a docházelo zde spíše k nadhodnocení metabolické aktivity, jelikož sporttester zřejmě nedokázal zachytit individuální rozdíly v klidových tepových frekvencích nebo tzv. stresové pulzy. Je však nutné poznamenat, že možnost aklimatizace přístroje by možná odstranila tyto potíže, a tak se otevírá prostor pro další výzkum.

Výrazně lepších výsledků dosáhl sporttester při odhadování metabolické aktivity pro činnosti o střední intenzitě, které byly reprezentovány jízdou na kole o regulovaném mechanickém odporu 100 W a 150 W. U obou činností dosahoval sporttester vysoké přesnosti, jelikož MAPE byla nižší než 10 %. Pro tyto činnosti je tak sporttester možné použít pro technické aplikace z hlediska predikce metabolické aktivity a jejího případného využití jako vstupu např. do termofyziologických modelů apod.

V rámci diplomové práce byla vytvořena podrobná rešerše na metody měření a odhadu metabolické aktivity, která zahrnovala také metodu odhadu metabolické aktivity ze srdeční frekvence. Při bližším prostudování tématu byly nalezeny predikční rovnice založené na tepové frekvenci. Data o tepové frekvenci byla naměřena, bylo tedy přistoupeno k využití těchto dat společně s predikčními rovnicemi, čím byl vytvořen další přístup odhadu metabolické aktivity. Následně bylo vytvořeno porovnání těchto dvou přístupů, které metabolickou aktivitu odhadují tj. (přímo ze sporttesteru Garmin Fenix 6X Pro a přímým výpočtem ze srdeční frekvence za využití naměřených dat o srdeční frekvenci totožným sporttesterem).

Sporttester Garmin Fenix 6X Pro využívá pro odhad metabolické aktivity komplexní predikční model, který není veřejně přístupný. Bylo tak zajímavé pozorovat, jestli a případně o kolik je odhad pomocí sporttesteru přesnější. Důležité je také zmínit, že do nalezených predikčních rovnic byla použita vstupní hodnota tepové frekvence naměřená přímo sporttesterem Garmin.

[45] SÚJCHBO je zkratka pro Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany. Ústav byl založen již v roce 1960 pod názvem Ústav pro hygienu práce a prevenci chorob z povolání. Tento název byl příznačný, jelikož v té době docházelo na území ČSR k těžbě a zpracování radioaktivních surovin z Jáchymovských dolů. Ústav poté prošel bohatým historickým vývojem, během kterého se rozšířila nejen jeho oblast zájmu, ale změnil se i název do podoby, ve kterého ho známe dnes [102].

Omezením nalezených predikčních rovnic však bylo jejich možné využití pouze pro činnosti o střední intenzitě. Sporttester Garmin Fenix 6X Pro vykazoval u obou činností MAPE nižší než 10 %, odhad z použitých predikčních rovnic vykazoval pro obě činnosti MAPE vyšší než 10 %. Je proto důležité poukázat na důležitost komplexnosti predikčního modelu, což má na odhad metabolické aktivity podstatný vliv.

Z důvodu nejen technických ale i etických/zdravotních byly pro testování voleny činnosti o nízké a střední intenzitě. V průběhu testování však vyvstala myšlenka zkusit testovat činnosti o vysoké intenzitě. K tomuto testování však bylo nutné nastudovat další důležité informace ohledně biologické funkce metabolismu. Po dostudování potřebných informací bylo zřejmé, že tohoto testování se nemohou účastnit všichni výše zmínění probandi. Proto byli vybráni dva, kteří výslovně s testováním souhlasili, byli v dobré fyzické kondici, a pro ně byl vytvořen zátěžový test, u kterého došlo k zapojení anaerobního metabolismu.

Výsledky tohoto testování byly také interpretovány v této práci, nicméně se jednalo pouze o testování na individuální úrovni. Nebylo tak možné vytvořit základní hodnocení pomocí střední procentuální absolutní chyby, jako v případě činností o střední a lehké intenzitě. Nicméně překvapením byla přesnost, s jakou sporttester pro tyto dva měřené subjekty dokázal metabolickou aktivitu odhadnout. Jednalo se prakticky o totožný odhad metabolické aktivity v porovnáním s měřenou hodnotou přístrojem Oxycon Mobile.

V průběhu realizace této práce bylo také nalezeno spoustu dalších oblastí, kterými by se budoucí výzkum mohl ubírat. První z nich je zaměření na vliv aklimatizace sporttesteru na přesnost odhadu metabolické aktivity. Problémem studií tohoto typu bude bezpochyby finanční stránka, jelikož bude pro postihnutí aklimatizace nutné pořídit více sporttesterů. Dalším směrem, kterým se již výzkum soukromého sektoru ubírá, je optimalizace matematických modelů, které stojí za predikcí energetického výdeje. Poslední zmíněnou oblastí, která by vyžadovala podrobný výzkum, je přesnost odhadu metabolické aktivity pomocí sporttesterů pro činnosti o vysoké intenzitě, u kterých je ve větší míře zapojen anaerobní metabolismus.

Ze zpracování diplomové práce tedy vyplývají výše uvedené možnosti dalšího výzkumu. Hlavním omezením se primárně jeví nemožnost 100% aklimatizace sporttesteru na fyziologické parametry daného probanda. Fyzické metriky byly vždy přednastaveny pro daného probanda, nicméně pro správnou aklimatizaci by bylo nutné dlouhodobé měření, které nebylo možné v rámci této diplomové práce uskutečnit.

Z výsledků diplomové práce lze tedy konstatovat, že i neaklimatizovaný sporttester Garmin Fenix 6X Pro predikuje metabolickou aktivitu s dostatečnou přesností pro aktivity o střední intenzitě, nicméně nedosahuje stále požadované přesnosti pro činnosti o nízké intenzitě pohybu, u kterých se výrazněji projevují individuální rozdíly.

SEZNAM ZNAČEK

$Q$ … teplo [J]

$q$ … měrné teplo [J/kg]

$A$ … objemová nebo mechanická práce, dle kontextu [J]

$a$ … měrná objemová práce [J/kg]

$A_t$ … technická práce [J]

$a_t$ … měrná technická práce [J/kg]

$E$ … energie [J]

$U$ … vnitřní energie [J]

$u$ … měrná vnitřní energie [J/kg]

$H$ … entalpie [J]

$h$ … měrná entalpie [J/kg]

$T$ … termodynamická teplota [K]

$p$ … tlak [Pa]

$V$ … objem [$m^3$]

$v$ … měrný objem [$m^3$/kg]

$m$ … hmotnost [kg]

$g$ … gravitační zrychlení [$m.s^{-2}$]

$z$ … výška [m]

$w$ … rychlost [m/s]

$S$ … entropie [J/K]

$s$ … měrná entropie [J/kg.K]

$\dot{Q}$ … tepelný tok [J/s, W]

$\dot{q}$ … měrný tepelný tok [$J/s.m^2$, $W/m^2$]

$\dot{m}$ … hmotnostní tok [kg/s]

$\lambda$… součinitel tepelné vodivosti [W/K.m]

$\sigma$ … Stefan-Boltzmannova konstanta $5{,}67.10^{-8}$ [$W/m^2.K^4$]

$\alpha$… součinitel přestupu tepla [$W/K.m^2$]

$\varepsilon$ … emisivita tělesa [-]

$E_{max}$… maximální tepelný tok odpařováním [W]

$p_{sk}$… nasycená tenze vodních par při teplotě kůže $t_{sk}$ [kPa]

$p_a$… parciální tenze vodních par ve vzduchu v okolí [kPa]

$h_e$… součinitel přestupu tepla odpařováním [W.m$^{-2}$.kPa$^{-1}$]

$S_{Ak}$ … množství tepla akumulovaného v organismu [W.m$^{-2}$]

$c_b$ … průměrná měrná tepelná kapacita lidského těla 3,47 [kJ/°C.kg]

$m_b$… hmotnost lidského těla [kg]

$\Delta t_{re}$ … změna rektální teploty [°C]

$\Delta\tau$ … čas [s]

$A_D$… plocha lidského těla [m$^2$]

$h_b$ … výška člověka [m]

$TP$ … tepelný výkon průměrného člověka [W]

$MR$ … metabolická aktivita [MET], kde 1 MET = 58,2 W.m$^{-2}$

$M$ … metabolické teplo [J]

$W_{ex}$… externí mechanická práce vztažena na jednotku času a plochu lidského těla [W/m$^2$]

$v$… rychlost pohybu [m/s]

$\gamma$ … sklon terénu [%]

$\theta$… venkovní teplota [°C]

$HR$…celková srdeční frekvence [tep/min]

$HR_0$…srdeční frekvence v klidu, v nakloněné poloze, za neutrálních tepelných podmínek [tep/min]

$\Delta HR_M$…zvýšení srdeční frekvence z důvodu dynamického zatížení svalů, za neutrálních tepelných podmínek [tep/min]

$\Delta HR_S$…zvýšení srdeční frekvence z důvodu statické svalové práce [tep/min]

$\Delta HR_T$…zvýšení srdeční frekvence z důvodu tepelného stresu (tepelná složka, ČSN ISO 9886 [29] [tep/min]

$\Delta HR_N$…zvýšení srdeční frekvence z důvodu mentálního zatížení [tep/min]

$\Delta HR_E$… změna srdeční frekvence z důvodu jiných faktorů, např. dehydratace [tep/min]

$HR_{Měřená}$…měřená srdeční frekvence [tep/min]

$EE$ … energetický ekvivalent [W.h/litr $O_2$],

$RQ$ … respirační kvocient,

$\dot{V}_{O_2}$… spotřeba kyslíku [l/h],

$\dot{V}_{CO_2}$…produkce oxidu uhličitého [l/h],

$\dot{V}_{Vex}$… průtok vzduchu [l/h], přepočteno na standardní podmínky tj. $\theta$ = 0 °C, p=101,3 kPa a suchý plyn,

$F_{O_2}$… podíl kyslíku ve vydechovaném vzduchu [-],

$F_{CO_2}$… podíl kysličníku uhličitého ve vydechovaném vzduchu [-],

$V_{ex}STPD$… objem vzduchu přepočten na standartní podmínky a suchý stav [m$^3$],

$V_{ex}ATPS$… objem vzduchu za atmosférického tlaku, teploty a vlhkosti [m$^3$],

$f$ … opravný faktor [-],

$p$ … měřený atmosférický tlak [kPa],

$p_{H_2O}$… parciální tlak nasycené vodní páry při teplotě $\theta$ [kPa],

$BMI$ …index tělesné hmotnosti [kg/m$^2$].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Schéma termodynamické soustavy, upraveno z [3] ..... 14
Obrázek 2 Příklad termodynamického systému, upraveno z [7] ..... 15
Obrázek 3 Ztráty tepla u neoblečeného člověka za různých teplotních podmínek, převzato z [1] ..... 22
Obrázek 4 Závislost BMR na věku, upraveno z [16] ..... 27
Obrázek 5 Přesnost odhadu BMR pomocí Harris-Benedictovy rovnice, upraveno z [18] ..... 28
Obrázek 6 Validace Mifflinovy rovnice, upraveno z [18] ..... 29
Obrázek 7 Vliv věku a BMI na hodnotu klidového metabolismu, upraveno z [23] ..... 30
Obrázek 8 Závislost RMR, tepové frekvence, energetického výdeje na BMI a věku zkoumaného jedince [24] ..... 31
Obrázek 9 Závislost energetického výdeje na intenzitě pohybu, upraveno z [32] ..... 35
Obrázek 10 Závislost energetického výdeje na rychlosti chůze a tělesné zátěži, upraveno z [32] ..... 36
Obrázek 11 Závislost MR na teplotě okolí pro různé typy oblečení, upraveno z [33] ..... 37
Obrázek 12 Závislost metabolické aktivity na energetickém výdeji a tepové frekvenci [25] . 37
Obrázek 13 Závislost PMV na metabolické aktivitě zobrazeno v čase [36] ..... 38
Obrázek 14 Schéma přímá kalorimetrie, upraveno z [1] ..... 40
Obrázek 15 Měření při využití Douglasova vaku, převzato z [42] ..... 45
Obrázek 16 Ilustrace zařízení Omnical, zdroj [43] ..... 46
Obrázek 17 Procentuální chyba energetického výdeje v porovnání pro jednotlivé měřiče, upraveno z [45] ..... 47
Obrázek 18 Průměrný RER, upraveno z [44] ..... 48
Obrázek 19 Přenosné zařízení Cosmed K5 [46] ..... 49
Obrázek 20 Oxycon Mobile [53] ..... 51
Obrázek 21 Přístroj Oxycon Mobile, upraveno z [53] ..... 52
Obrázek 22 Průběh měření, upraveno z [57] ..... 53
Obrázek 23 Podrobný měřicí protokol, včetně řazení jednotlivých činností, dle ANAND, upraveno z [25] ..... 54
Obrázek 24 Závislost spotřeby kyslíku na zvyšující se srdeční frekvenci pro futsal [62] ..... 57
Obrázek 25 Závislost spotřeby kyslíku na srdeční frekvenci pro běh na běžícím pásu s kontinuálním zvyšováním rychlosti [62] ..... 57
Obrázek 26 Změna srdeční frekvence v závislosti na typu oděvu [66] ..... 60
Obrázek 27 Odhad MR z CO2 a z HR [68] ..... 63
Obrázek 28 Relativní chyba, upraveno z [76] ..... 65
Obrázek 29 Zobrazení porovnání MAPE pro jednotlivé činnosti, upraveno z [78]. Činnost 1 – odpočinek, 2 – běžné denní aktivity, 3 – odporový trénink, 4 – chůze, 5 – běh, 6 – sprint, 7 – jízda na kole, 8 – maximální výkon kolo, 9 – dvoudenní nošení, 10 – přerušované ..... 66
Obrázek 30 Energetický výdej Garmin Fenix 5, upraveno z [81] ..... 67
Obrázek 31 Plán měření [82] ..... 68
Obrázek 32 Energetický výdej komparace chytrých hodinek s přístrojem využívajícím nepřímou kalorimetrii, vlastní zpracování, upraveno z [82] ..... 68
Obrázek 33 Hodinky Garmin Fenix 6X, vlastní zdroj ..... 69
Obrázek 34 Oxycon Mobile, Kolo s trenažérem, dýchací maska ..... 70
Obrázek 35 Umístění hodinek Garmin Fenix 6X PRO [93] ..... 70

Obrázek 36 Schéma měřícího protokolu, vlastní zdroj ..... 72
Obrázek 37 Fotografie z testování, vlastní zdroj ..... 73
Obrázek 38 Výsledky činnost ležení, vlastní zpracování ..... 74
Obrázek 39 Závislost odhadu na srdeční frekvenci, vlastní zpracování ..... 75
Obrázek 40 Metabolická aktivita pro činnost administrativní práce, vlastní zpracování ..... 76
Obrázek 41 Závislost odhadu MR na srdeční frekvenci pro administrativní práci, vlastní zpracování ..... 77
Obrázek 42 Metabolická aktivita pro činnost jízda na kole s regulovaným odporem 100 W, vlastní zpracování ..... 78
Obrázek 43 Závislost odhadu na srdeční frekvenci pro jízda na kole 100 W, vlastní zpracování ..... 79
Obrázek 44 Metabolická aktivita jízda na vnitřním kole o odporu 150 W, vlastní zdroj ..... 80
Obrázek 45 Závislost odhadu MR na HR pro činnost jízda na kole s regulovaným odporem 150 W, vlastní zpracování ..... 81
Obrázek 46 Metabolická aktivita pro měřené činnosti, vlastní zdroj ..... 82
Obrázek 47 MAPE pro Garmin Fenix 6X Pro, vlastní zpracování ..... 84
Obrázek 48 Porovnání měřené metabolické aktivity a odhadované pomocí Garmin Fenix 6X a matematických rovnic využívajících tepovou frekvenci, vlastní zpracování ..... 86
Obrázek 49 Porovnání metabolické aktivity pro činnost jízda na kole 150 W, vlastní zpracování ..... 87
Obrázek 50 Vyhodnocení metabolické aktivity na skupinové úrovni, vlastní pracování ..... 87
Obrázek 51 Porovnání MAPE pro sporttester a odhad ze srdeční frekvence, vlastní zpracování ..... 88
Obrázek 53 Anaerobní práh, zdroj [89] ..... 90
Obrázek 52 Laktátová křivka, upraveno z [90] ..... 90
Obrázek 54 Průběh metabolické aktivity v závislosti na čase, vlastní zpracování ..... 92
Obrázek 55 Průběh metabolické aktivity na čase, vlastní zpracování ..... 93

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 BMI index ..... 28
Tabulka 2 Tlak nasycené vodní páry v kPa [31] ..... 43

# 10 Zdroje

[1] SLABOTINSKÝ, Jiří a Kamila LUNEROVÁ. *Fyziologická zátěž člověka při práci v osobních ochranných prostředcích v kontaminovaném prostředí*. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2017. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). ISBN 978-80-7385-192-7.

[2] ROSDAHL, Hans, Lennart GULLSTRAND, Jane SALIER-ERIKSSON, Patrik JOHANSSON a Peter SCHANTZ. Evaluation of the Oxycon Mobile metabolic system against the Douglas bag method. *European Journal of Applied Physiology*. 2010, **109**(2), 159-171. ISSN 1439-6319. Dostupné z: doi:10.1007/s00421-009-1326-9

[3] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6.

[4] INCOPERA, Frank P. a David P. DEWITT. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 4. Canada: John Wiley and Sons, Inc., 1996. ISBN 0-471-30460-3.

[5] JÍCHA, Miroslav. *Přenos tepla a látky*. Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2029-4.

[6] AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. *2001 ASHRAE handbook: fundamentals*. 1. Atlanta: GA.: ASHRAE., 2001. ISBN 1883413885.

[7] MORAN, Michael J., Daisie D. BOETTNER a Margaret B. BAILEY. *Fundamentals of engineering Thermodynamics*. 8. United States of America: Courier/Kendallville, 2014. ISBN 978-1-118-82044-5.

[8] GUAN, Manhao, Haijiang ZHANG, Jun LI, Fabrizio SPANO, Martin CAMENZIND, Simon ANNAHEIM a René Michel ROSSI. Development of a sweating thermal skin simulant for heat transfer evaluation of clothed human body under radiant heat hazard. *Applied Thermal Engineering*. 2020, **166**. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.114642

[9] D, Du Bois a Du Bois EF. *A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known.* Arch. Intern. Med. vol.17: no.6, 1916, s. 863-872.

[10] FONTANA, Josef, Jan TRNKA, Patrik MAĎA, Petr IVÁK, Petra LAVRÍKOVÁ, Lucie NOVÁKOVÁ, Martin PAVELKA a Martina ŠAJDÍKOVÁ. *Funkce buněk a lidského těla* [online]. Projekt byl vytvořen na základě podpory: FRVŠ 637/2013, 236078/IPUK/2015, 236087/IPUK/2016-2018. 2018 [cit. 2022-08-06].

[11] WESTON, Trevor. *Atlas lidského těla*. [Česko: s.n., 2003. ISBN 80-732-1092-4.

[12] Metabolismus. In: *Informační systém Masarykovy univerzity* [online]. [cit. 2022-08-06]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/ped/podzim2016/UOPK_6001/METABOLISMUS.pdf

[13] FONTANA, Josef, Jan TRNKA, Patrik MAĎA, Petr IVÁK, Petra LAVRÍKOVÁ, Lucie NOVÁKOVÁ a Martina ŠAJDÍKOVÁ. *Funkce buněk a lidského těla* [online]. 2018 [cit. 2022-08-06]. Dostupné z: http://fblt.cz/skripta/ii-premena-latek-a-energie-v-bunce/8-krebsuv-cyklus/

[14] GUPTA, RiddhiDas, Roshna RAMACHANDRAN, Padmanaban VENKATESAN, Shajith ANOOP, Mini JOSEPH a Nihal THOMAS. Indirect calorimetry: From bench to bedside. *Indian Journal of Endocrinology and Metabolism*. 2017, **21**(4). ISSN 2230-8210. Dostupné z: doi:10.4103/ijem.IJEM_484_16

[15] HARRIS, J.A a F.G BENEDICT. *A Biometric Study of Human Basal Metabolism*. 4. USA: Proc.Natl.Acad.Sci, 1918, s. 370-373.

[16] LUO, Maohui, Zhe WANG, Kevin KE, Bin CAO, Yongchao ZHAI a Xiang ZHOU. Human metabolic rate and thermal comfort in buildings: The problem and challenge. *Building and Environment*. 2018, **131**, 44-52. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2018.01.005

[17] HENRY, CJK. Basal metabolic rate studies in humans: measurement and development of new equations. *Public Health Nutrition*. 2005, **8**(7), 1133-1152. ISSN 1368-9800. Dostupné z: doi:10.1079/PHN2005801

[18] FRANKENFIELD, David C., William A. ROWE, J. Stanley SMITH a R.N. COONEY. Validation of several established equations for resting metabolic rate in obese and nonobese people. *American Dietetic Association*. 2003, (1039), 1152-1159. Dostupné z: doi:10.1053/jada.2003.50575

[19] NUTTALL, Frank Q. Body Mass Index. *Nutrition Today*. 2015, **50**(3), 117-128. ISSN 0029-666X. Dostupné z: doi:10.1097/NT.0000000000000092

[20] *World Health Organization* [online]. [cit. 2022-08-06]. Dostupné z: https://www.who.int/, https://www.zdrava-dieta.com/index-telesne-hmotnosti-bmi/

[21] LAUREN, Mark a Jashua CLARK. *Tělo jako posilovna*. 1. Pražská 5, 811 01 Bratislava: TIMY PARTNESRS spol. s.r.o., 2010. ISBN 978-80-89311-36-1.

[22] MIFFLIN, M D, S T ST JEOR, L A HILL, B J SCOTT, S A DAUGHERTY a Y O KOH. A new predictive equation for resting energy expenditure in healthy individuals. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 1990, **51**(2), 241-247. ISSN 0002-9165. Dostupné z: doi:10.1093/ajcn/51.2.241

[23] MCMURRAY, ROBERT G., JESUS SOARES, CARL J. CASPERSEN a THOMAS MCCURDY. *Examining Variations of Resting Metabolic Rate of Adults*. 2014, **46**(7), 1352-1358. ISSN 0195-9131. Dostupné z: doi:10.1249/MSS.0000000000000232

[24] HAUGEN, Heather A, Edward L MELANSON, Zung Vu TRAN, Jay T KEARNEY a James O HILL. Variability of measured resting metabolic rate. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2003, **78**(6), 1141–1144. Dostupné z: doi:10.1093/ajcn/78.6.1141

[25] ANAND, Vivek, Devi SENDHIL a E. RAJASEKAR. Estimating the metabolic rate and associated physiological response for Indian subjects through climate chamber experiments. *Building and Environment*. 2022, **207**. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2021.108466

[26] SCHOFFELEN, Paul F. M., Marcel DEN HOED, Eric VAN BREDA a Guy PLASQUI. *Test-retest variability of VO 2max using total-capture indirect calorimetry reveals linear relationship of VO 2 and Power*. 2019, **29**(2), 213-222. ISSN 09057188. Dostupné z: doi:10.1111/sms.13324

[27] GAO, Wei Dong, Olli-Pekka NUUTTILA, Hai Bo FANG, Qian CHEN a Xi CHEN. A New Fitness Test of Estimating VO2max in Well-Trained Rowing Athletes. *Frontiers in Physiology*. 2021, **12**. ISSN 1664-042X. Dostupné z: doi:10.3389/fphys.2021.701541

[28] ABRAHAMS, Peter H. *Jak pracuje lidské tělo: [ilustrovaná encyklopedie anatomie a funkcí všech částí lidského těla]*. Praha, 2014. ISBN 978-80-256-1160-9.

[29] ČSN EN ISO 9886. *Ergonomie - Hodnocení tepelné zátěže podle fyziologických měření*. Brusel: Evropský výbor pro normalizaci, Řídící centrum: rue de Stassart 36, B-1050 Brusel, 2004.

[30] LIGHTON, John R. B. *Measuring metabolic rates : a manual for scientists*. 1. Metabolism—Measurement. I. Title. 198 Madison Avenue, New York, New York 10016: Oxford University Press, Inc., 2008. ISBN 978-0-19-531061-0.

[31] ČSN EN ISO 8996. *Ergonomie tepelného prostředí - Určování metabolizmu*. Brusel: Evropský výbor pro normalizaci: Řídící centrum rue-de-Stassart 36 B-1050, 2004.

[32] PASSMORE, R. a J. V. G. A. DURNIN. Human Energy Expenditure. *Physiological Reviews* [online]. 1955, **35**(4), 801-840 [cit. 2022-08-14]. ISSN 0031-9333. Dostupné z: doi:10.1152/physrev.1955.35.4.801

[33] JANOTKOVÁ, Eva. *Technika prostředí* [online]. VUT, FSI Obor termomechaniky a techniky prostředí, 2014 [cit. 2022-08-14]. Dostupné z: https://eu.fme.vutbr.cz/pro-studenty-podpora-vyuky-technika-prostredi

[34] LUO, Maohui, Xiang ZHOU, Yingxin ZHU a Jan SUNDELL. Revisiting an overlooked parameter in thermal comfort studies, the metabolic rate. *Energy and Buildings*. 2016, **118**, 152-159. ISSN 0378-7788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2016.02.041

[35] ČSN EN ISO 7730. *Ergonomie tepelného prostředí - Analytické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukazatelů PMV a PPD a kritéria místního tepelného komfortu*. 76678. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.

[36] HASAN, Mohammad H., Fadi ALSALEEM a Mostafa RAFAIE. Sensitivity study for the PMV thermal comfort model and the use of wearable devices biometric data for metabolic rate estimation. *Building and Environment*. 2016, **110**, 173-183. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2016.10.007

[37] HAVENITH, G. a D. FIALA. *Thermal Indices and Thermophysiological Modeling for Heat Stress*. [online]. 255-302 [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: doi:10.1002/cphy.c140051. Erratum in: Compr Physiol. 2016;6(2):1134. PMID: 26756633.

[38] FIALA, Dusan, Kevin LOMAS a Martin STOHRER. First principles modeling of thermal sensation responses in steady-state and transient conditions. *ASHRAE transactions*. 2003, **109**(179).

[39] BłAżEJCZYK, Krzysztof, Peter BROEDE, Dusan FIALA, George HAVENITH, Ingvar HOLMÉR, Gerd JENDRITZKY, Bernhardt KAMPMANN a Anna KUNERT. Principles of the New Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its Application to Bioclimatic Research in European Scale. *Miscellanea Geographica*. 2010, **14**(1), 91-102. ISSN 2084-6118. Dostupné z: doi:10.2478/mgrsd-2010-0009

[40] HILLS, Andrew P., Najat MOKHTAR a Nuala M. BYRNE. Assessment of Physical Activity and Energy Expenditure: An Overview of Objective Measures. *Frontiers in Nutrition*. 2014, **1**. ISSN 2296-861X. Dostupné z: doi:10.3389/fnut.2014.00005

[41] SLABOTÍNSKÝ, J. *Výzkum moderních metod detekce a indentifikace nebezpečných chemických, biologických a jaderných radioaktivních látek (CBRN) a materiálů, metod snížení jejich nebezpečnosti a dekontaminace: výzkum moderních prostředků ochrany osob a prvků kritické infrast.* 1-104, 2013. Roční zpráva k výzkumnému projektu, MV VF 2011105013. MV VF 2011105013.

[42] SALIER, Eriksson, Jane. *The heart rate method for estimating oxygen uptake in walking and cycle commuting: Evaluations based on reproducibility and validity studies of the heart rate method and a portable metabolic system*. Stockholm: Gymnastik- och idrottshögskolan, GIH , 2018. ISBN 978-91-983151-4-1.

[43] *Indirect calorimetry* [online]. Universiteitssingel 50, 6229 ER Maastricht [cit. 2022-09-04]. Dostupné z: https://www.indirectcalorimetry.net/

[44] KAVIANI, Sepideh, Dale A. SCHOELLER, Eric RAVUSSIN et al. Determining the Accuracy and Reliability of Indirect Calorimeters Utilizing the Methanol Combustion Technique. *Nutrition in Clinical Practice*. 2018, **33**(2), 206-216. ISSN 08845336. Dostupné z: doi:10.1002/ncp.10070

[45] ALCÁNTARA, Alcántara a Juan MANUEL. *Assessment of resting energy expenditure and nutrient oxidation by indirect calorimetry: methodological implications: doctoral tesis*. 1. Granada: Universidad de Granada. Programa de Doctorado en Biomedicina, 2021. ISBN 9788413067407.

[46] *COSMED the Metabolic company* [online]. Via dei Piani di Mt. Savello, 37 00041 Albano Laziale (RM) Italia [cit. 2022-09-04]. Dostupné z: https://www.cosmed.com/en/

[47] CROUTER, Scott E., Samuel R. LAMUNION, Paul R. HIBBING, Andrew S. KAPLAN, David R. BASSETT a Jeremy P. LOENNEKE. Accuracy of the Cosmed K5 portable calorimeter. *PLOS ONE*. 2019, **14**(12). ISSN 1932-6203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0226290

[48] WHITE, Lindsey E., Jacob P. DEBLOIS a Tiago V. BARREIRA. *Reliability Analysis of the COSMED K5 Portable Metabolic System*. 2019, **51**(6), 162-162. ISSN 1530-0315. Dostupné z: doi:10.1249/01.mss.0000560990.10036.c4

[49] PEREZ-SUAREZ, Ismael, Marcos MARTIN-RINCON, Juan José GONZALEZ-HENRIQUEZ et al. Accuracy and Precision of the COSMED K5 Portable Analyser. *Frontiers in Physiology*. 2018, **9**. ISSN 1664-042X. Dostupné z: doi:10.3389/fphys.2018.01764

[50] DUFFIELD, R, B DAWSON, H.C. PINNINGTON a P WONG. Accuracy and reliability of a Cosmed K4b2 portable gas analysis system. *Journal of Science and Medicine in Sport*. 2004, **7**(1), 11-22. ISSN 14402440. Dostupné z: doi:10.1016/S1440-2440(04)80039-2

[51] BIGARD, AX a CY GUEZENNEC. Evaluation of the Cosmed K2 telemetry system during exercise at moderate altitude. *Med Sci Sports Exerc*. 1995, **27**(9), 1333-88531634.

[52] *Vyaire Medical* [online]. [cit. 2022-09-18]. Dostupné z: https://www.vyaire.com/company-overview

[53] *Oxycon Mobile, návod k obsluze: Kurka.Med s.r.o.* 5. 141 00 Praha, Na Nivách18: Viasys healthcare.

[54] SCHOFFELEN, Paul F. M., Marcel DEN HOED, Eric VAN BREDA a Guy PLASQUI. Test-retest variability of VO 2max using total-capture indirect calorimetry reveals linear relationship of VO 2 and Power. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* [online]. 2019, **29**(2), 213-222 [cit. 2022-09-04]. ISSN 09057188. Dostupné z: doi:10.1111/sms.13324

[55] AKKERMANS, MA, MJ SILLEN, EF WOUTERS a MA SPRUIT. Validation of the oxycon mobile metabolic system in healthy subjects. *J Sports Sci Med*. 2012, **11**(1), 182-3241370703737831.

[56] SALIER ERIKSSON, Jane, Hans ROSDAHL a Peter SCHANTZ. Validity of the Oxycon Mobile metabolic system under field measuring conditions. *European Journal of Applied Physiology*. 2012, **112**(1), 345-355. ISSN 1439-6319. Dostupné z: doi:10.1007/s00421-011-1985-1

[57] CARTER, James a Asker JEUKENDRUP. Validity and reliability of three commercially available breath-by-breath respiratory systems. *European Journal of Applied Physiology*. 2002, **86**(5), 435-441. ISSN 1439-6319. Dostupné z: doi:10.1007/s00421-001-0572-2

[58] CROUTER, Scott E., Amanda ANTCZAK, Jonathan R. HUDAK, Diane M. DELLAVALLE a Jere D. HAAS. Accuracy and reliability of the ParvoMedics TrueOne 2400 and MedGraphics VO2000 metabolic systems. *European Journal of Applied Physiology*. 2006, **98**(2), 139-151. ISSN 1439-6319. Dostupné z: doi:10.1007/s00421-006-0255-0

[59] GASMIN, Eric, Leslie Yessenia CASTILLO-ORTIZ, Ryan P. DURK, Kent A. LORENZ, Marialice KERN, C. Matthew LEE a James R. BAGLEY. Applications and Efficacy of Portable Wearable Metabolic Devices. *Innovation in Physical Activity and Sport*. Cham: Springer International Publishing, 2022, 9-25. Lecture Notes in Bioengineering. ISBN 978-3-030-92896-4. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-92897-1_2

[60] AINSWORTH, BARBARA E., WILLIAM L. HASKELL, MELICIA C. WHITT et al. *Compendium of Physical Activities: an update of activity codes and MET intensities*. 2000, **32**(), 498-516. ISSN 0195-9131. Dostupné z: doi:10.1097/00005768-200009001-00009

[61] ACHTEN, Juul a Asker E JEUKENDRUP. Heart Rate Monitoring. *Sports Medicine*. 2003, **33**(7), 517-538. ISSN 0112-1642. Dostupné z: doi:10.2165/00007256-200333070-00004

[62] SILVA, Henrique Santos da, Fabio Yuzo NAKAMURA, Marcelo PAPOTI, Alexsandro Santos DA SILVA a Julio Wilson DOS-SANTOS. Relationship Between Heart Rate, Oxygen Consumption, and Energy Expenditure in Futsal. *Frontiers in Psychology*. 2021, **12**. ISSN 1664-1078. Dostupné z: doi:10.3389/fpsyg.2021.698622

[63] DUBÉ, Philippe-Antoine, Daniel IMBEAU, Denise DUBEAU, Luc LEBEL a Ahmet KOLUS. Removing the thermal component from heart rate provides an accurate V ˙ O 2 estimation in forest work. *Applied Ergonomics*. 2016, **54**, 148-157. ISSN 00036870. Dostupné z: doi:10.1016/j.apergo.2015.12.005

[64] VOGT, J. J., M. TH. MEYER-SCHWEKTZ, B. METZ a R. FOEHE. Motor, Thermal and Sensory Factors in Heart Rate Variation: A Methodology for Indirect Estimation of Intermittent Muscular Work and Environmental Heat Loads. *Ergonomics*. 1973, **16**(1), 45-60. ISSN 0014-0139. Dostupné z: doi:10.1080/00140137308924481

[65] KAMPMANN, Bernhard, Bernhard KALKOWSKY a Claus PIEKARSKI. Estimation of metabolic rate from cardiac frequency for field studies: correcting for "thermal pulses". *Journal of Thermal Biology*. 2001, **26**(4-5), 437-440. ISSN 03064565. Dostupné z: doi:10.1016/S0306-4565(01)00057-2

[66] DUBÉ, Philippe-Antoine, Daniel IMBEAU, Denise DUBEAU, Isabelle AUGER a Mario LEONE. Prediction of work metabolism from heart rate measurements in forest work: some practical methodological issues. *Ergonomics*. 2015, **58**(12), 2040-2056. ISSN 0014-0139. Dostupné z: doi:10.1080/00140139.2015.1044920

[67] MALCHAIRE, Jacques, Francesca Romana D'AMBROSIO ALFANO a Boris Igor PALELLA. Evaluation of the metabolic rate based on the recording of the heart rate. *INDUSTRIAL HEALTH*. 2017, **55**(3), 219-232. ISSN 0019-8366. Dostupné z: doi:10.2486/indhealth.2016-0177

[68] JI, Wenjie, Maohui LUO, Bin CAO, Yingxin ZHU, Yang GENG a Borong LIN. A new method to study human metabolic rate changes and thermal comfort in physical exercise by CO2 measurement in an airtight chamber. *Energy and Buildings*. 2018, **177**, 402-412. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2018.08.018

[69] AINSWORTH, BARBARA E., WILLIAM L. HASKELL, ARTHUR S. LEON, DAVID R. JACOBS, HENRY J. MONTOYE, JAMES F. SALLIS a RALPH S. PAFFENBARGER. *Compendium of Physical Activities: classification of energy costs of human physical activities*. 1993, **25**(1), 71-80. ISSN 0195-9131. Dostupné z: doi:10.1249/00005768-199301000-00011

[70] BE, Ainsworth, Haskell WL, Herrmann SD et al. The Compendium of Physical Activities: Tracking Guide. Healthy Lifestyles Research Center, College of Nursing & Health Innovation. In: *World Wide Web* [online]. Arizona State University [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: https://sites.google.com/site/compendiumofphysicalactivities/home

[71] ROOS, Lilian, Wolfgang TAUBE, Nadja BEELER a Thomas WYSS. Validity of sports watches when estimating energy expenditure during running. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*. 2017, **9**(1). ISSN 2052-1847. Dostupné z: doi:10.1186/s13102-017-0089-6

[72] WAHL, Yvonne, Peter DÜKING, Anna DROSZEZ, Patrick WAHL a Joachim MESTER. Criterion-Validity of Commercially Available Physical Activity Tracker to Estimate Step Count, Covered Distance and Energy Expenditure during Sports Conditions. *Frontiers in Physiology*. 2017, **8**. ISSN 1664-042X. Dostupné z: doi:10.3389/fphys.2017.00725

[73] BOUDREAUX, BENJAMIN D., EDWARD P. HEBERT, DANIEL B. HOLLANDER et al. *Validity of Wearable Activity Monitors during Cycling and Resistance Exercise*. 2018, **50**(3), 624-633. ISSN 0195-9131. Dostupné z: doi:10.1249/MSS.0000000000001471

[74] LEE, JUNG-MIN, YOUNGWON KIM a GREGORY J. WELK. Validity of Consumer-Based Physical Activity Monitors. *Medicine & Science in Sports & Exercise* [online]. 2014, **46**(9), 1840-1848 [cit. 2023-05-20]. ISSN 0195-9131. Dostupné z: doi:10.1249/MSS.0000000000000287

[75] NELSON, M. BENJAMIN, LEONARD A. KAMINSKY, D. CLARK DICKIN a ALEXANDER H. K. MONTOYE. Validity of Consumer-Based Physical Activity Monitors for Specific Activity Types. *Medicine & Science in Sports & Exercise* [online]. 2016, **48**(8), 1619-1628 [cit. 2023-05-20]. ISSN 0195-9131. Dostupné z: doi:10.1249/MSS.0000000000000933

[76] WOODMAN, JAMES A., SCOTT E. CROUTER, DAVID R. BASSETT, EUGENE C. FITZHUGH a WILLIAM R. BOYER. *Accuracy of Consumer Monitors for Estimating Energy Expenditure and Activity Type*. 2017, **49**(2), 371-377. ISSN 0195-9131. Dostupné z: doi:10.1249/MSS.0000000000001090

[77] REDDY, Ravi Kondama, Rubin POONI, Dessi P ZAHARIEVA et al. Accuracy of Wrist-Worn Activity Monitors During Common Daily Physical Activities and Types of Structured Exercise: Evaluation Study. *JMIR mHealth and uHealth*. 2018, **6**(12). ISSN 2291-5222. Dostupné z: doi:10.2196/10338

[78] GILGEN-AMMANN, Rahel, Theresa SCHWEIZER a Thomas WYSS. Accuracy of the Multisensory Wristwatch Polar Vantage's Estimation of Energy Expenditure in Various Activities: Instrument Validation Study. *JMIR mHealth and uHealth*. 2019, **7**(10). ISSN 2291-5222. Dostupné z: doi:10.2196/14534

[79] WALLEN, Matthew P., Sjaan R. GOMERSALL, Shelley E. KEATING, Ulrik WISLøFF, Jeff S. COOMBES a Jose A. L. CALBET. Accuracy of Heart Rate Watches: Implications for Weight Management. *PLOS ONE*. 2016, **11**(5). ISSN 1932-6203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0154420

[80] EVENSON, Kelly R. a Camden L. SPADE. Review of Validity and Reliability of Garmin Activity Trackers. *Journal for the Measurement of Physical Behaviour*. 2020, **3**(2), 170-185. ISSN 2575-6605. Dostupné z: doi:10.1123/jmpb.2019-0035

[81] EVENSON, Kelly R., Michelle M. GOTO a Robert D. FURBERG. Systematic review of the validity and reliability of consumer-wearable activity trackers. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*. 2015, **12**(1). ISSN 1479-5868. Dostupné z: doi:10.1186/s12966-015-0314-1

[82] O'DRISCOLL, Ruairi, Jake TURICCHI, Kristine BEAULIEU, Sarah SCOTT, Jamie MATU, Kevin DEIGHTON, Graham FINLAYSON a James STUBBS. How well do activity monitors estimate energy expenditure? A systematic review and meta-analysis of the validity of current technologies. *British Journal of Sports Medicine*. -2018-0996431. ISSN 0306-3674. Dostupné z: doi:10.1136/bjsports-2018-099643

[83] DÜKING, Peter, Laura GIESSING, Marie Ottilie FRENKEL, Karsten KOEHLER, Hans-Christer HOLMBERG a Billy SPERLICH. Wrist-Worn Wearables for Monitoring Heart Rate and Energy Expenditure While Sitting or Performing Light-to-Vigorous Physical Activity: Validation Study. *JMIR mHealth and uHealth*. 2020, **8**(5). ISSN 2291-5222. Dostupné z: doi:10.2196/16716

[84] LE, Shenglong, Xiuqiang WANG, Tao ZHANG, Si Man LEI, Sulin CHENG, Wu YAO a Moritz SCHUMANN. Validity of three smartwatches in estimating energy expenditure during outdoor walking and running. *Frontiers in Physiology*. 2022, **13**. ISSN 1664-042X. Dostupné z: doi:10.3389/fphys.2022.995575

[85] KOPECKÝ, David. *Ověření predikce metabolismu na základě vykonávané činnosti*. Brno, 2021. Bakalářská. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Barbora Kopečková.

[86] *Aplikace pro indoor cyklistiku* [online]. ROUVY 2023: VirtualTraining s.r.o., 2023 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: https://rouvy.com/cs

[87] REEVES, T., S. BATES, T. SHARP et al. Cardiopulmonary exercise testing (CPET) in the United Kingdom—a national survey of the structure, conduct, interpretation and funding. *Perioperative Medicine*. 2018, **7**(1). ISSN 2047-0525. Dostupné z: doi:10.1186/s13741-017-0082-3

[88] GOSSELINK, R., T. TROOSTERS a M. DECRAMER. Exercise testing: why, which and how to interpret. *Breathe*. 2004, **1**(2), 120-129. ISSN 1810-6838. Dostupné z: doi:10.1183/18106838.0102.120

[89] COOPER, Christopher B. a Thomas W. STORER. *Exercise testing and interpretation*. 1. United Kingdom, Cambridge: University Press, 2001. ISBN 0 521 64842 4.

[90] LEHNERT, Michal, Michal BOTEK, Martin SIGMUND et al., Jan DOSTÁL. *Kondiční trénink* [online]. 1. Univerzita Palackého v Olomouci, 2014 [cit. 2023-05-03]. ISBN 978-80-244-4369-0. Dostupné z: https://publi.cz/books/149/06.html

[91] ŠKORPIL, Miloš. TF-laktát-aerobní práh-bod varu. In: *Archiv - Běžecká škola Miloše Škorpila* [online]. Tovární 579, 356 01 Sokolov, 2020 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: https://www.archivbezeckaskola.cz/clanek-681-tf-laktat-aerobni-prah-bod-varu.html

[92] Anaerobní metabolismus. In: *Národní zdravotnický informační portál* [online]. Palackého náměstí 375/4 128 01 Praha 2 – Nové Město [cit. 2022-08-21]. Dostupné z: https://www.nzip.cz/rejstrikovy-pojem/3925

[93] *E-ChemBook.Eu: Multimediální učebnice pro gymnázia* [online]. RNDr. Jan Břížďala: Národní knihovna ČR [cit. 2022-11-06]. Dostupné z: http://e-chembook.eu/krebsuv-cyklus-a-dychaci-retezec

[94] ALCANTARA, Juan M.A., Guillermo SANCHEZ-DELGADO, Francisco J. AMARO-GAHETE, Jose E. GALGANI a Jonatan R. RUIZ. Impact of the Method Used to Select Gas Exchange Data for Estimating the Resting Metabolic Rate, as Supplied by Breath-

by-Breath Metabolic Carts. *Nutrients*. 2020, **12**(2). ISSN 2072-6643. Dostupné z: doi:10.3390/nu12020487

[95] MEYER, J.P. a D. FLENFHI. De´termination de la de´pense e´nerge´tique de travail et des capacite´s cardiorespiratoires maximales a` l'aide d'un exercice sous maximal sur step test. *Documents pour le Me´decin du Travail*. 1995, **4**(64), 245-251.

[96] ROBERTSON, AH, K KING, SD RITCHIE, AP GAUTHIER, M LAURENCE a SC DORMAN. Validating the Use of Heart Rate Variability for Estimating Energy Expenditure. *International Journal of Human Movement and Sports Sciences*. 2015, **3**(2), 19-26. ISSN 2381-4381. Dostupné z: doi:10.13189/saj.2015.030203

[97] MEAN ABSOLUTE PERCENTAGE ERROR (MAPE). *Encyclopedia of Production and Manufacturing Management*. Boston, MA: Springer US, 2000, 462-462. ISBN 978-0-7923-8630-8. Dostupné z: doi:10.1007/1-4020-0612-8_580

[98] Malnutrice (podvýživa) - Fakultní nemocnice Brno. In: *Fakultní nemocnice Brno* [online]. Jihlavská 20, Brno: Via Aurea s.r.o. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://www.fnbrno.cz/areal-bohunice/oddeleni-lecebne-vyzivy/malnutrice-podvyziva/t7316

[99] *Systémy pro kardiopulmonární zátěžové testy*. Uživatelská příručka, Compek Medical Services. Walter-Köhn-Str. 2d D 04356 Leipzig Ÿ Německo: CORTEX Biophysic gmbH, 2020.

[100] Cortex MetaMax 3B,komplet. In: *COMPEK MEDICAL SERVICES, s.r.o.* [online]. COMPEK MEDICAL SERVICES, s. r. o. Dlouhá 615, 506 01 Jičín (provozovna pro ČR) [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://www.compek.cz/e-shop/cortex-metamax-3b-komplet_823-011.html/

[101] NOVÁK, Tomáš. Levák, pravák, něco mezi? Zkřížená lateralita jako výhoda i hendikep. In: *Vitalia.cz* [online]. Copyright © 1997 – 2023 Internet Info, s.r.o. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://www.vitalia.cz/clanky/levak-pravak-neco-mezi-zkrizena-lateralita-jako-vyhoda-i-hendikep/

[102] Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany. In: *Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany* [online]. [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: https://www.sujchbo.cz/o-nas/historie-ustavu/

[103] Pletysmografie/Nemocnice AGEL Třinec-Podlesí. In: *Nemocnice AGEL Třinec-Podlesí* [online]. Konská 453, 739 61 Třinec, 2023 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: https://nemocnicetrinecpodlesi.agel.cz/pracoviste/ambulance/nzp/pletysmografie.html