



**České vysoké učení technické v Praze**

**Fakulta elektrotechnická**

**Katedra mikroelektroniky**

**Cyklistický měřič výkonu**

Bakalářská práce

**Aron Primas**

Studijní program: Elektronika a komunikace

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Teplý

**Praha 2022**



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Primas** Jméno: **Aron** Osobní číslo: **483568**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Cyklistický měřič výkonu**

Název bakalářské práce anglicky:

**Cycling Power Meter**

Pokyny pro vypracování:

Proveďte návrh a realizaci cyklistického měřiče výkonu. Vyberte vhodnou konstrukci, navrhnete a realizujte cyklistický měřič výkonu, který bude měřit energii vynaloženou cyklistou. Dále proveďte sběr, zpracování a zobrazení měřených údajů.

Postup řešení:

- 1) Prostudujte nabídku aktuálně komerčně dostupných cyklistických měřičů výkonu, proveďte porovnání a zhodnocení klíčových vlastností. Na základě porovnání definujte vlastnosti, které by měl splňovat vámi realizovaný měřič výkonu.
- 2) Proveďte návrh vlastního řešení, které bude splňovat požadavky z předchozího bodu.
- 3) Zařízení realizujte.
- 4) Otestujte funkčnost Vašeho řešení.
- 5) Shrňte dosažené výsledky a uveďte srovnání s komerčními výrobky.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Yiu, J.: The Definitive Guide to ARM Cortex-M3 and Cortex-M4 Processors Third Edition, Elsevier, 2014
- [2] Záhlava, V.: Návrh a konstrukce desek plošných spojů, BEN, Praha, 2011

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Tomáš Teplý katedra mikroelektroniky FEL**

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

Datum zadání bakalářské práce: **26.01.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

Ing. Tomáš Teplý  
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_ Datum převzetí zadání

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

## **Prohlášení**

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

Praha, 9. 5. 2022

## Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Tomáši Teplému za čas, vedení a vstřícný přístup a panu Ing. Petru Vilímovi za cenné rady při návrhu měřícího zařízení a darování modulu operačního zesilovače. Další poděkování patří *Laboratoři pro vývoj a realizaci* při Fakultě elektrotechnické za možnost zde pracovat na této práci a využít k tomu jejich vybavení.

Aron Primas

## **Abstrakt**

Práce se zabývá popisem měřiče výkonu cyklistova šlapání, technologickými řešeními tohoto zařízení a srovnává konkrétní komerční výrobky. Dále se práce zabývá návrhem a následnou realizací vlastního amatérského měřicího zařízení, které se zmíněnými řešeními inspiruje a popisuje výběr provedení měřiče, jeho mechanický princip a elektronické zapojení a způsob zpracování změřených dat a jejich následné přenesení do aplikace v chytrém telefonu. Přístroj byl vyroben, testován a změřená data (výkon a kadence šlapání) jsou následně porovnána s daty z cyklopočítače Sigma *BC 23.16*, který disponuje funkcí snímání kadence a výpočtu výkonu. Z porovnání jsou vyneseny možnosti optimalizace funkce přístroje. Je provedena kalkulace finančních nákladů na stavbu tohoto zařízení a jejich porovnání s cenami komerčních výrobků.

## **Klíčová slova**

Měřič výkonu, výkon, jízdní kolo, pedál, tenzometr, síla, rychlost, kadence, ESP 32, Bluetooth, váhový senzor, operační zesilovač, Arduino IDE, Sigma *BC 23.16*, *Bluetooth Serial Terminal*

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with measuring devices of cyclist's pedaling power, its different technological implementations and compares specific commercial products. The work deals with design and realisation of a self-produced measuring device with inspiration from aforesaid implementations and includes selection of the implementation, mechanical principle of the device, design of the electronic circuit and processing of the harvested data and its transmission to a smartphone application. The device was built, tested and the data (power and cadence of pedaling) were compared with the data from a bike computer Sigma *BC 23.16* which provides cadence sensing and calculation of power. Options for optimization of the device function are then made from the comparison. The work eventually includes calculation of construction costs and its comparison with commercial products.

## **Key words**

Power meter, power, bicycle, pedal, strain gauge, force, velocity, cadence, ESP 32, Bluetooth, load sensor, operational amplifier, Arduino IDE, Sigma *BC 23.16*, *Bluetooth Serial Terminal*

## Obsah

Úvod.....	8
1 Měřič výkonu cyklisty .....	9
1.1 Klikový měřič výkonu .....	12
1.2 Měřič umístěný v pavouku .....	14
1.3 Měřič umístěný ve středové ose .....	15
1.4 Měřič výkonu integrovaný v zadním náboji .....	16
1.5 Pedálový měřič výkonu .....	17
1.6 Měřič zabudovaný v podrážce obuvi.....	19
1.7 Vložkový měřič výkonu .....	20
1.8 Odhad výkonu z měření rychlosti, kadence a stoupání trasy .....	21
1.9 Srovnání měřičů výkonu.....	22
2 Návrh měřícího zařízení.....	23
2.1 Výběr řešení pro vlastní projekt a jeho princip .....	23
2.2 Zpracování měřených veličin .....	28
2.3 Bezdrátový Bluetooth přenos hodnot .....	32
3 Realizace měřícího zařízení .....	33
3.1 Lepení tenzometrických můstků na pedál .....	33
3.2 Lepení hliníkové destičky na tenzometrické můstky .....	34
3.3 Zapájení a instalace elektroniky .....	36
3.4 Zpracování měřených dat modulem LoLin32 .....	37
3.5 Testování měřícího zařízení .....	44
3.6 Zhodnocení výsledků experimentu.....	48
3.7 Cenová kalkulace měřícího zařízení .....	53
Závěr.....	54
Seznam literatury.....	56

## Úvod

Měřiče výkonu cyklisty, též velmi často nazývané anglicismem *wattmetry*, jsou důležitým zařízením, které jezdcům profesionálního pelotonu i amatérským cyklistům poskytuje cenné měření jejich fyzického úsilí – výkonu šlapání do pedálů jízdního kola. V této bakalářské práci se budu věnovat principu funkce těchto měřičů včetně uvedení jednotlivých technologických řešení samotného přístroje s konkrétními příklady produktů na trhu. Jednotlivé příklady budou porovnány z hlediska prodejní ceny, přesnosti měření výkonu, výdrže baterie a aditivní hmotnosti, kterou s sebou dané řešení přináší.

I přes velký rozvoj wattmetrů v posledních letech je jejich prodejní cena, která řádově začíná na deseti tisících korunách, činí stále nedostupnými pro řadu amatérských cyklistů. V práci se budu věnovat návrhu prototypu vlastního amatérského měřiče výkonu, který bude inspirován jedním z již zavedených technologických řešení, avšak náklady na jeho výrobu jej budou činit dostupným téměř každému cyklistovi, který si chce podobné zařízení vyzkoušet. Práce bude dále obsahovat fyzickou realizaci tohoto měřiče a jeho otestování při jízdě na kole včetně vyhodnocení získaných dat – výkonu a frekvence šlapání.



# 1 Měřič výkonu cyklisty

První měřič výkonu cyklisty, umístěný na klikách bicyklu (konkrétně na spojení převodníků a kliky) byl patentován v roce 1986 Ulrichem Schobererem [1]. Takzvaný wattmetr je dnes nepostradatelnou součástí výbavy profesionálních jezdců na nejvyšších cyklistických soutěžích, jako je Tour de France, Giro di Italia či Vuelta a España. Díky konceptu Internet of Things jsou údaje, jako je kadence šlapání, výkon, gradient trasy či srdeční tep, bezdrátově přenášeny (protokoly ANT+, Bluetooth či Wifi) na cyklopočítač nebo chytrý telefon a přináší tak jasný analytický přístup k tréninku cyklistů. Rozvoj technologií výroby a vznik konkurenčních výrobků ale tento přístroj přiblížil i rekreačním jezdcům. Přesto vzhledem k technicky náročnému měření a relativně nové technologii začíná kupní cena těchto zařízení na 5–10tisících korun.

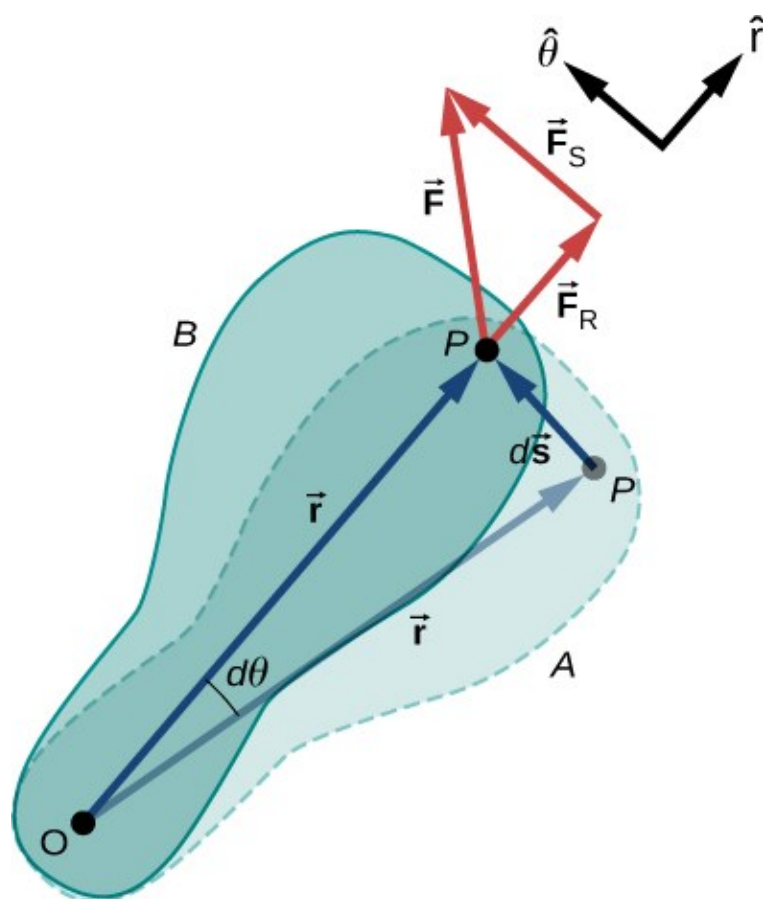
Všechny tyto měřiče výkonu mají společný základní fyzikální princip, kdy z měřené síly  $F$  v newtonech (či kroučícího momentu, který je jí úměrný), rychlosti působitě  $v$  (v metrech za sekundu) a úhlu jejich vektorů  $\theta$  (v radiánech) za využití vztahu [2]

$$P = F \cdot v \cdot \cos\theta \tag{1}$$

vypočítávají výkon  $P$  (ve wattech). Tento vztah uvažuje obecný směr síly a rychlosti jejího působitě. Pokud bychom uvažovali jejich působení ve stejném směru, přešel by vztah do zjednodušení

$$P = F \cdot v \tag{2}$$

Následující obrázek znázorňuje těleso rotující kolem osy O (například klika rotující kolem osy středového složení jízdního kola). Síla  $\vec{F}$  obecně nemusí na tělesový bod P působit ve vztahu ke spojnici bodů P a O ( $\vec{r}$ ) kolmo. V tom případě je potřeba počítat s průnikem síly do tohoto kolmého směru.



Obrázek 1: Síla působící na rotující těleso [3]

K měření síly tyto přístroje používají tenzometry (kdy je flexe materiálu úměrná působící síle) či senzory tlaku (přímé měření síly nohou). Pro získání rychlosti je v nejjednodušším případě možné využít snímače otáček (magnet a senzor magnetického pole), který měří frekvenci otáčení  $f$  (v otáčkách za sekundu), z čehož je poté dopočítávána rychlost  $v$  dle vztahu

$$v = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot r, \quad (3)$$

kde  $\pi$  představuje Ludolfovo číslo a  $r$  poloměr (v metrech) pomyslného kruhu, který opisuje působíště síly  $F$ .

Dalším řešením je použití integrovaného akcelerometru, což má oproti předchozímu velkou výhodu v možnosti získání hodnoty okamžité rychlosti. Díky tomuto provedení je poté výkon vypočten přesněji, neboť rychlost (například pedálu – pedálový wattmetr, viz níže) není konstantní a v různých fázích záběru nohy (poloha kliky) má do určité míry různou hodnotu.

Podle umístění wattmetru na bicyklu či cyklistovi lze tyto přístroje rozdělit do několika kategorií. V každé kategorii u konkrétního produktu uvedu jeho prodejní cenu, přesnost měření, výdrž baterie a aditivní hmotnostní zátěž oproti standardnímu komponentu, který nahrazuje.

## 1.1 Klikový měřič výkonu

Tento způsob měření výkonu je pravděpodobně nejpoužívanější. Tenzometrický můstek a senzor otáček ve spojení s ANT+, WiFi či Bluetooth modulem měří flexi v materiálu kliky (slitina hliníku či kompozit z uhlíkových vláken), ke které dochází jako přirozený důsledek působící síly na materiál s konečnou tuhostí, a změřený údaj přenáší do cyklistického počítače či chytrého telefonu.

Klikový měřič výkonu se vyrábí v provedení pro jednostranné či oboustranné měření. Jednostranné měření využívá měření výkonu pouze prostřednictvím jedné nohy a výsledný výkon uvádí jako dvojnásobek naměřené hodnoty. Oboustranné měření snímá výkon obou noh a cyklistovi prezentuje naměřený výkon zvlášť pro levou a pravou nohu. Druhý zmíněný postup má tu výhodu, že umožňuje cyklistovi sledovat asymetrii šlapání a odhalit fyziologické problémy jezdce či nastavení cyklistických komponentů. Umístění pohonu (kliky s převodníky, řetěz a pastorky) na pravé straně bicyklu způsobuje typicky lehce vyšší výkonové zatížení pravé nohy, jde však spíše o zanedbatelné hodnoty, které jsou ale čitelné z oboustranného měření výkonu.

Porovnáním identických klik ve verzi s wattmetrem a bez wattmetru lze nahlédnout na aditivní hmotnost, kterou tento přístup přináší. K tomuto účelu lze použít například kliky *Dura Ace FC-R9100* (bez wattmetru) resp. *FC-R9100-P* (obsahující wattmetr). Podle výrobce Shimano pro kombinaci převodníků 53-39 činní hmotnost setu klik (pravá s osou + levá) ve verzi bez wattmetru 626 gramů, pro verzi s wattmetrem hmotnost činní 696 gramů, což představuje 70gramový rozdíl při oboustranném měření výkonu. Výrobce uvádí 2% přesnost měřeného údaje a výdrž baterie 300 hodin. Cena těchto klik činí 1 499,99 amerických dolarů [4][5].



Obrázek 2: Kliky s wattmetrem Shimano FC-R9100-P [6]

## 1.2 Měřič umístěný v pavouku

Wattmetry založené na tomto principu využívají tenzometry nalepené uvnitř pavouka – komponentu, spojujícího kliku s převodníky. Firma SRM při výrobě wattmetrů do pavouka instaluje 8 či 16 tenzometrů. Pro tužší komponenty jich stačí při stejné přesnosti 8, pro flexibilnější komponenty jich je potřeba 16 [7].

Toto technologické řešení přináší zásadní nevýhodu, spočívající v možnosti měřit pouze celkový výkon bez možnosti rozlišení výkonu levé a pravé nohy, což jej znevýhodňuje oproti konkurenčním výrobkům. Cena wattmetru SRM *Origin* se pohybuje v rozmezí 1 899–2 499 amerických dolarů. Uváděná přesnost měření činí 1,5 % zobrazovaného údaje. Hmotnost při provedení s převodníky *Dura Ace* s 53/39 zuby činí 663 gramů a výdrž baterie 1900 hodin [8] [9].



Obrázek 3: Wattmetr SRM Origin [10]

V porovnání se zmíněným klikovým wattmetrem *Dura Ace FC-R9100-P*, u něhož hmotnost v provedení převodníků 53-39 zubů činí 696 gramů, se jedná o poměrně lehké kliky, kde však je měření prováděno pouze jednostranně (oproti porovnávaným *Dura Ace*, které měří výkon oboustranně).

### 1.3 Měřič umístěný ve středové ose

Firma Easton Cycling uvedla na trh technologické řešení měření výkonu *Cinch*, které bere v úvahu kroutící moment, který je vyvolán záběrem levé nohy. Síla působící na levou kliku se dále přenáší krutem na středovou osu až k pravé klice a následně k převodníku, kde je umístěn řetěz. Umístěním tenzometrů dovnitř osy pak výrobek snímá zmíněnou flexi, která je úměrná působící síle.



Obrázek 4: Wattmetr Cinch [11]

Toto řešení postrádá možnost měřit výkon obou nohou zvlášť. Neakční prodejní cena tohoto produktu činí 599,99 amerických dolarů. Uváděná přesnost měření výkonu produktem činí 2 %, hmotnostní zátěž oproti obyčejné ose představuje 65 gramů a výdrž na jedno nabití až 400 hodin.[12]

## 1.4 Měřič výkonu integrovaný v zadním náboji

Značka PowerTap, patřící pod firmu SRAM, přišla s řešením G3, které integruje wattmetr do zadního náboje.



### Inside the G3 – How it works

1. As the user applies load to the drivetrain...
2. Strain gages mounted on the torque tube measure the torque
3. Angular Velocity is measured by the speed sensor located in the PowerCap
4. Torque and angular velocity measurements are used to calculate power and sent to the user's headunit.



Obrázek 5: Průřez wattmetrem PowerTap G3 [13]

Uvnitř náboje je tzv. kroutící trubka, která na něj přenáší sílu působící přes řetěz na pastorky zadního náboje. Osm tenzometrů snímá krut působící na tuto trubku a wattmetr z něj a z rychlosti jeho otáčení dopočítává cyklistův výkon [14].

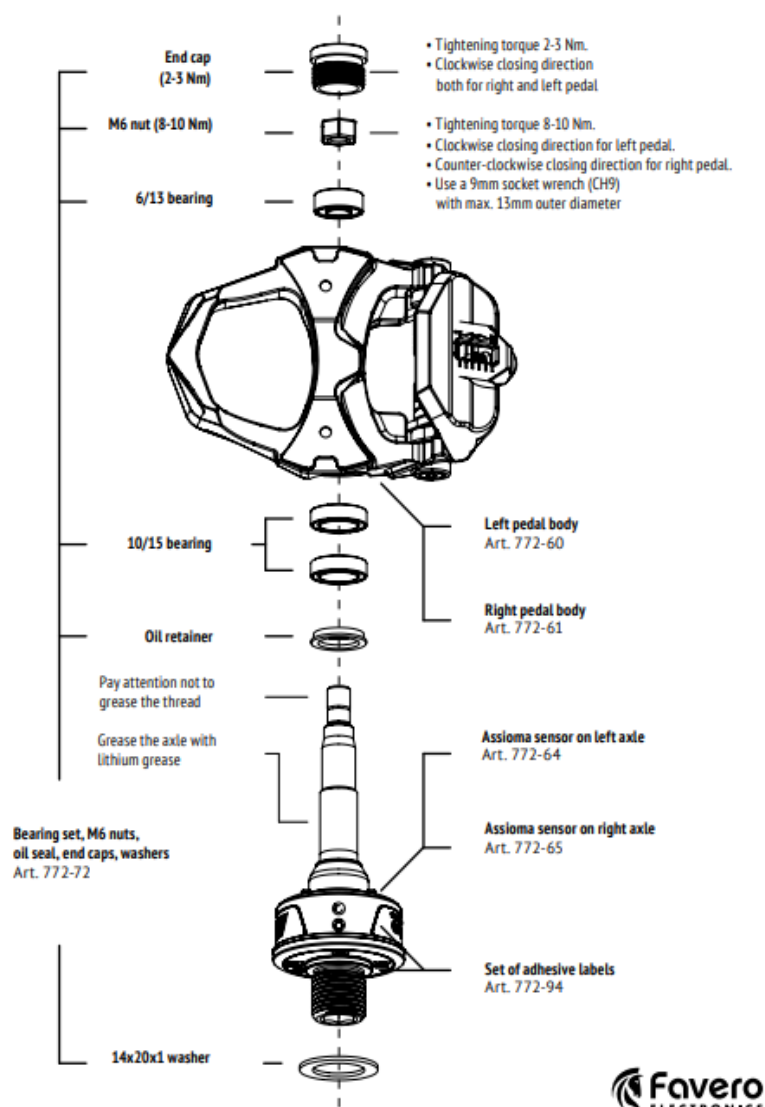
Prodejní cena tohoto produktu činí 1 425,75 amerických dolarů. Tento výrobek měří výkon s přesností 1,5 % a hmotnost náboje činí 315 gramů, což lze porovnat například s jedním z nejlehčích zadních silničních nábojů firmy Zipp, nábojem 188, který váží 188 gramů. Výrobce udává výdrž baterie je 300 hodin [15] [16].



## 1.5 Pedálový měřič výkonu

Jedná se o velmi rozšířený způsob, kdy je k měření výkonu použit pedál se zabudovaným senzorem síly či s tenzometry aplikovanými na osu pedálu. Obdobně jako u řešení s klikami, i zde je možnost měření výkonu jedné (celkový výkon získán násobením dvěma) či obou nohou.

Prodejní cena činí pro jednostranný měřič výkonu *Assioma Uno* firmy Favero 488 amerických dolarů. Hmotnostní přítěž tohoto pedálového wattmetru činí 21 gramů při jednostranném použití oproti stejnému pedálu bez tohoto zařízení, jenž váží 151 gramů. Přesnost měřeného výkonu je 1 % a výdrž baterie na jedno nabití činí 50 hodin [17].



Obrázek 6: Rozložený wattmetr Favero Assioma [17]

Jiné provedení wattmetru od tohoto výrobce nabízí možnost zakoupit si osu pedálu, ve které je integrovaný totožný měřič výkonu jako v předchozím případě, a následně ji použít na pedál firmy Shimano. Toto lze však provést jen pro nejnovější generace těchto pedálů. Cena je v případě os na oba pedály 662 dolarů, pro srovnání při koupi pedálů na obě strany (*Assioma Duo*) zaplatíme 761 dolarů. Zhruba 100dolarový rozdíl odpovídá ceně kvalitních silničních pedálů, tedy obě řešení jsou pro zákazníky atraktivní [18].

## 1.6 Měřič zabudovaný v podrážce obuvi

Technologické řešení firmy Luck využívalo silový senzor umístěný v podrážce tretry v místě přenosu síly z chodidla na pedál. Toto provedení však na trhu nebylo úspěšné a v současné době se nedá zakoupit.



Obrázek 7: Pohled na elektroniku wattmetru firmy Luck [19]

## 1.7 Vložkový měřič výkonu

Tento produkt firmy RPM<sup>2</sup> využívá k měření výkonu silové senzory umístěné ve vložce obuvi. Výhodou tohoto řešení je možnost využít vložku mimo cyklistiku i k jiným sportům (převážně k běhu). V současné době je tento výrobek ve fázi testování a nejsou k němu dostupné podrobnější informace či běžná prodejní cena.



Obrázek 8: Vložkový wattmetr firmy RPM<sup>2</sup> [20]

## 1.8 Odhad výkonu z měření rychlosti, kadence a stoupání trasy

Cyklopočítač firmy Sigma *BC 23.16 STS* je schopen vypočítávat výkon jezdce při znalosti šířky jeho ramen, hmotnosti těla, typu kola (silniční kolo nebo časovkářský speciál) a dále ze změřené rychlosti, stoupání trasy a kadence. Nelze dohledat, jak přesně je výkon vypočítáván, lze však odhadovat, že ze zadaného typu kola, šířky cyklistových ramen a rychlosti jízdy je vypočítán výkon, nutný k překonání odporu vzduchu a ze stoupání a rychlosti je dále vypočítána část výkonu, která je potřebná k překonání gravitačních sil. Samotná kadence je pro odhad výkonu také nezbytná (cyklopočítač jinak zobrazuje nulový výkon), avšak její využití v tomto výpočtu výkonu není jasné. Jakožto uživatel tohoto přístroje mohu zhodnotit, že vypočítaný výkon orientačně odpovídá realitě (porovnání s kolegou podobné tělesné stavby, který vlastní profesionální wattmetr při společném tréninku) pouze při zanedbatelné klidové rychlosti větru a převážně ve větších stoupáních (alespoň 2%) a nižších rychlostech, kdy reálný odpor vzduchu cyklisty a kola více odpovídá jeho odhadnuté hodnotě. V klesání se i při evidentním cyklistově úsilí téměř vždy zobrazuje nulový výkon.



Obrázek 9: Cyklopočítač Sigma BC 23.16 [21]

## 1.9 Srovnání měřičů výkonu

Následující tabulka přehledně srovnává zmíněné měřice cyklistova výkonu z hlediska ceny, přesnosti, aditivní hmotnosti oproti alternativnímu standardnímu komponentu a udávané výdrže baterie (srovnání se týká pouze těch, u nichž lze tyto parametry dohledat).

Tabulka 1: Srovnání vybraných wattmetrů v parametrech ceny, přesnosti měření, aditivní hmotnosti a výdrže baterie

Název	Shimano <i>FC-R9100-P</i>	SRM <i>Origin</i>	Easton Cycling <i>Cinch</i>	PowerTap <i>G3</i>	Favero <i>Assioma Uno</i>
Typ měřiče	klikový	pavoukový	osový	nábojový	pedálový
Cena	\$1499	\$1899-2499	\$599,99	\$1425,75	\$488
Přesnost	2 %	1,5 %	2 %	1,5 %	1 %
Aditivní hmotnost	70 g	37 g (oproti <i>FC-R9100</i> )	65 g	127 g	31 g
Výdrž baterie	300 h	1900 h	400 h	300 h	50 h

Jak je z tabulky patrné, nejdostupnějším wattmetrem ve srovnání je *Assioma Uno*, jenž však nabízí velmi omezenou výdrž baterie, která vedle ostatních výrobků zaostává o řád hodin. Nicméně je nutné brát v potaz, že výrobcem deklarovaná a v provozu reálná výdrž baterie u porovnávaných produktů se mohou a často výrazně liší.

Pokud nebude brána v potaz cena, lze považovat minimálně z hlediska výdrže baterie jako nejlepší volbu wattmetr *Origin*, jenž nabízí téměř o řád lepší výdrž než ostatní zmiňované produkty.

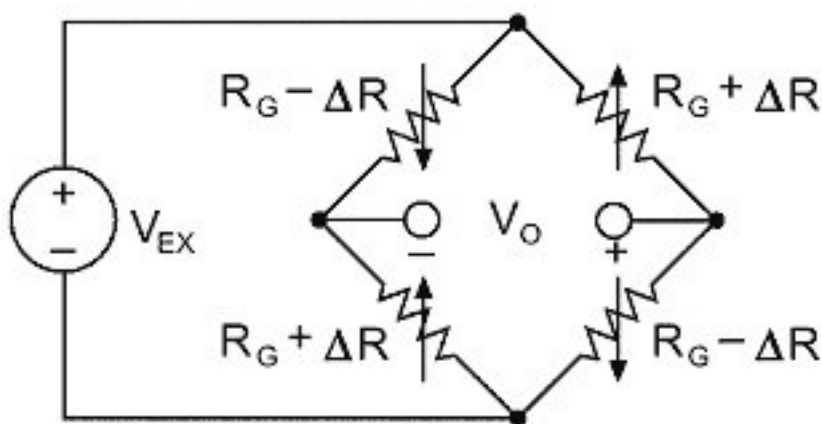
Z hlediska udávané přesnosti měření výkonu nabízí porovnávané wattmetry velmi podobné hodnoty, které se pohybují kolem 1–2 %, nicméně je nutno si uvědomit, že v reálném provozu mohou tyto hodnoty být odlišné a také se lišit podle zatížení měřiče, kdy přesnost při aplikaci například výkonu 1500 wattů může být velmi odlišná od přesnosti při aplikaci 250 wattů.

Aditivní hmotnost měřiče je největší u nábojového wattmetru *G3*, jenž v porovnání s nábojem firmy Zipp, *188*, přidává hmotnost 127 gramů. Osobně vidím větší problém spíše v estetickém hledisku, kdy samotná zapletená kola s tímto nábojem působí poněkud podivně, neboť jeho rozměry jsou výrazně větší, než u naprosté většiny zadních silničních nábojů a oproti ostatním měřičům výkonu je jednou z prvních věcí, které si pozorovatel při pohledu na jím osazené jízdní kolo všimne.

## 2 Návrh měřicího zařízení

### 2.1 Výběr řešení pro vlastní projekt a jeho princip

V praktické části této bakalářské práce se budu věnovat návrhu vlastního měřiče výkonu. Z technologických řešení wattmetru uvedených v teoretické části si jedno vyberu a budu se jím inspirovat pro návrh vlastního měřiče výkonu cyklisty. Je důležité, aby šlo o nepříliš složitou konstrukci, která nebude vyžadovat větší zásah do komponentů, který by omezoval či znemožňoval jejich původní funkci. Měřič by neměl být vázaný na jeden konkrétní bicykl, mělo by jít o komponent, který lze z kola demontovat, podobně jako je tomu u zmiňovaných komerčních řešení. Je také nutné, aby byl měřič přenosný a nebyl vázaný na napájení elektrickou sítí. Vzhledem k těmto požadavkům mě původně nejvíce zaujalo řešení klikového wattmetru, neboť jsem se domníval, že samotná integrace součástek na kliku nebude příliš komplikovaná a zároveň jsem již měl k dispozici náhradní kliku, kterou lze pro tento projekt využít. Na kliku *Sora FC-R3000* výrobce Shimano jsem pro snímání síly  $F$  experimentálně v polovině délky nalepil epoxidovým lepidlem na spodní a horní stranu vždy dva tenzometry (každý s odporem 350 ohmů) a zapojil je do plného Wheatstoneova můstku, viz následující schéma.



Obrázek 10: Schéma plného Wheatstoneova můstku [22]

Jak je ze zapojení patrné, tento můstek poskytuje díky využití 4 kusů tenzometru čtyřikrát větší přesnost měření, než kdyby byl v obvodu využit jen jeden tenzometr. Hodnota odporu  $R_G$  (v ohmech) představuje základní odpor tenzometru, od kterého se odečítá (zkracování tenzometru), respektive ke kterému se přičítá (prodlužování) hodnota odporu  $\Delta R$ , která představuje dynamickou změnu odporu tenzometru způsobenou prohnutím kliky. Při napájení

napětím  $V_{EX}$  (ve voltech) bude výstupní napětí  $V_O$  nabývat hodnoty dle následujícího vzorce:

$$V_O = -V_{EX} \cdot \left( \frac{\Delta R}{R} \right) \quad (4)$$

Toto zapojení také kompenzuje teplotní výkyvy, neboť při změně odporu vlivem teploty se tato změna projeví násobením odporu v čitateli i jmenovateli, což na výsledné napětí nebude mít žádný vliv. To je velmi výhodné a důležité, neboť přístroj je nutné navrhnout pro použití v různých teplotách, které se při jízdě mohou skokově měnit, například při přejezdu ze silnice na přímém slunci do stinného lesa.

Při výběru tenzometru jsem zvolil konstantanový typ s odporem 350 ohmů. Koeficient relativní změny odporu na změnu délky tohoto tenzometru  $k = 2,1$  [23].

Samotné tenzometry byly přilepeny na klice epoxidovým lepidlem tak, aby dva kusy byly silou působící na kliku prodlužovány a dva kusy byly zkracovány. Tento typ lepidla je vhodný pro použití na tenzometry, neboť je vytvrzováno chemickou cestou a nikoliv odpařováním rozpouštědla [24].



Obrázek 11: Pokusná klika s nalepenými tenzometry



Při experimentálním zapojení byl můstek napájen akumulátorem o nominálním napětí 7,4 V. Po instalaci kliky na kolo, montáži pedálu a připojení digitálního voltmetru byla na pedal vyvinuta maximální dostupná síla, avšak nebyla patrná jakýkoli změna v měřeném napětí. Selhání tohoto zapojení přičítám s největší pravděpodobností příliš malé změně měřeného prohnutí kliky. Toto by se dalo optimalizovat zeslabením kliky, kdy by byla snížena její tuhost a bylo by snazší detekovat prohnutí způsobené aplikovanou silou, avšak vzhledem k nejasným výsledkům jsem se rozhodl pro jiné provedení pokusného wattmetru.

Měřič výkonu bude využívat stejné elektrické schéma jako v předchozím případě, avšak mechanicky bude snímat sílu zcela odlišným způsobem. Na pedálu jízdního kola budou instalovány dva váhové senzory s maximálním zatížením 50 kg, z nichž každý obsahuje dva tenzometry o odporu 1000 ohmů a tyto následně zapojeny dle již využitého schématu.



Obrázek 12: Váhový senzor pro zatížení do 50 kg [25]

Na senzory bude následně nalepena hliníková destička, která bude sloužit k přenosu síly z chodidla na váhové senzory. Pro zjednodušení je uvažováno, že cyklista působí na tuto destičku silou chodidla vždy kolmo ve směru spojnice osy středového složení (ukotvení kliky) a osy pedálu a žádnou silou nepůsobí v jiném směru.

Pro měření kadence, která je nezbytná pro výpočet výkonu (rychlost  $v$  působí síly  $F$  je úměrná kadenci) bude použit magnetický spínač, který je obvykle využíván cyklopočítačem ke snímání otáček kola. Tento sensor bude připevněn na pedál a na ose pedálu bude umístěn magnet, který při každé otáčce tento sensor na okamžik sepne.

Na sensor bude přivedeno napětí a z periody  $T$  (v sekundách) jeho spínání bude vypočtena kadence  $f$  dle následujícího vzorce

$$f = \frac{1}{T} \quad (5)$$

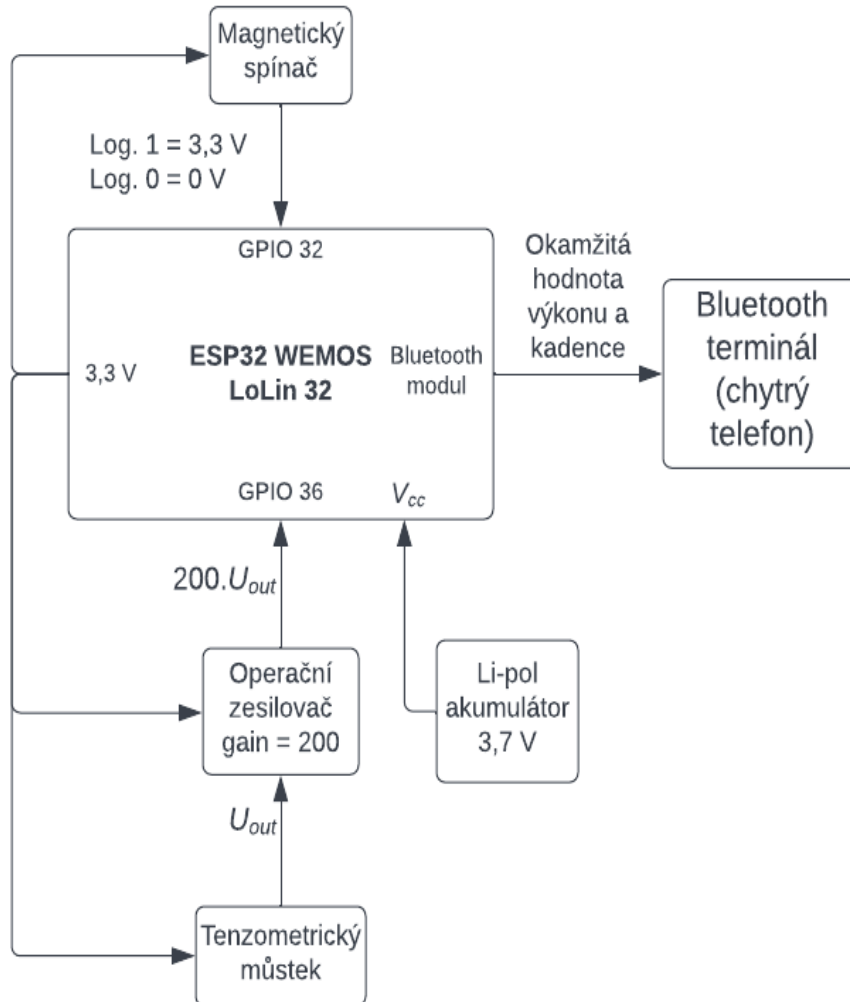
Dále bude vypočtena z kadence  $f$  rychlost pedálu  $v$  dle vzorce

$$v = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot r \quad (3)$$

kde  $r$  značí poloměr pomyslného kruhu, který bude obepisovat osa pedálu. Tato hodnota koresponduje s délkou kliky, která je výrobce udávána jako vzdálenost osy středového složení bicyklu a osy pedálu.

## 2.2 Zpracování měřených veličin

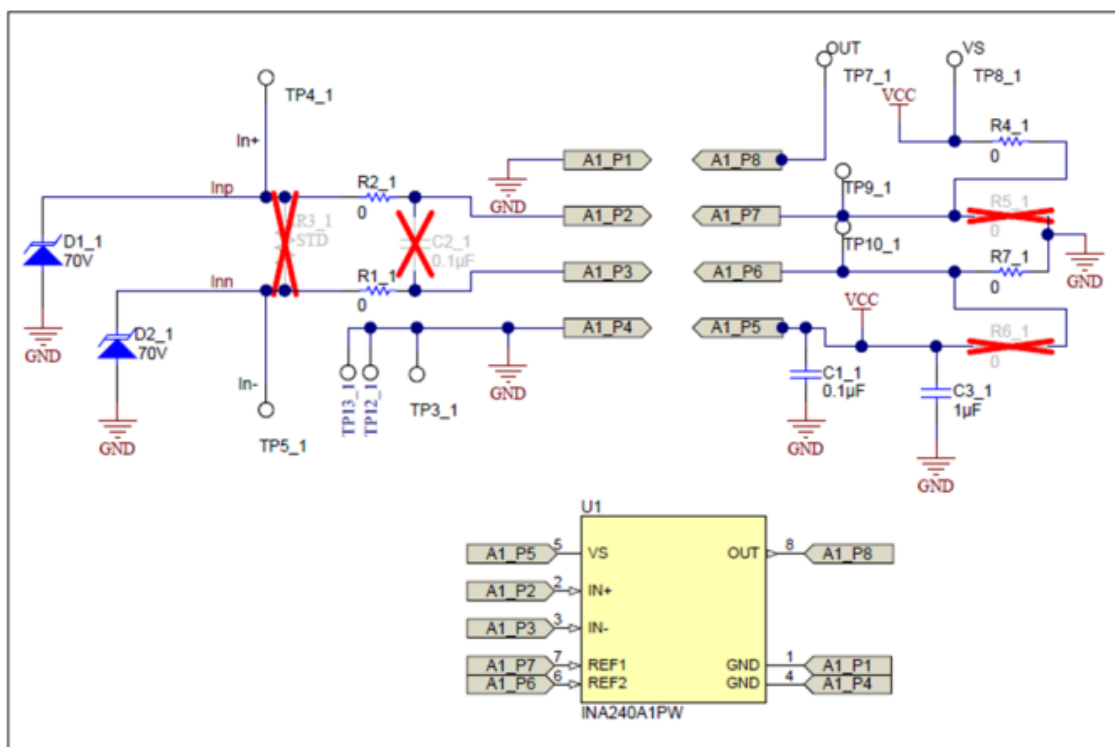
Následující obrázek znázorňuje blokové schéma navrhovaného wattmetru.



Obrázek 13: Blokové schéma pokusného wattmetru

Napětí  $V_o$ , které je výstupem Wheatstoneova můstku, bude nejprve zesíleno modulem operačního zesilovače *INA240A4* firmy Texas Instruments. Tento zesilovač byl k experimentu darován Laboratoří pro vývoj a realizaci (LVR), jenž patří pod Fakultu elektrotechnickou ČVUT. Tento zesilovač nabízí 200násobné zesílení vstupního napětí.

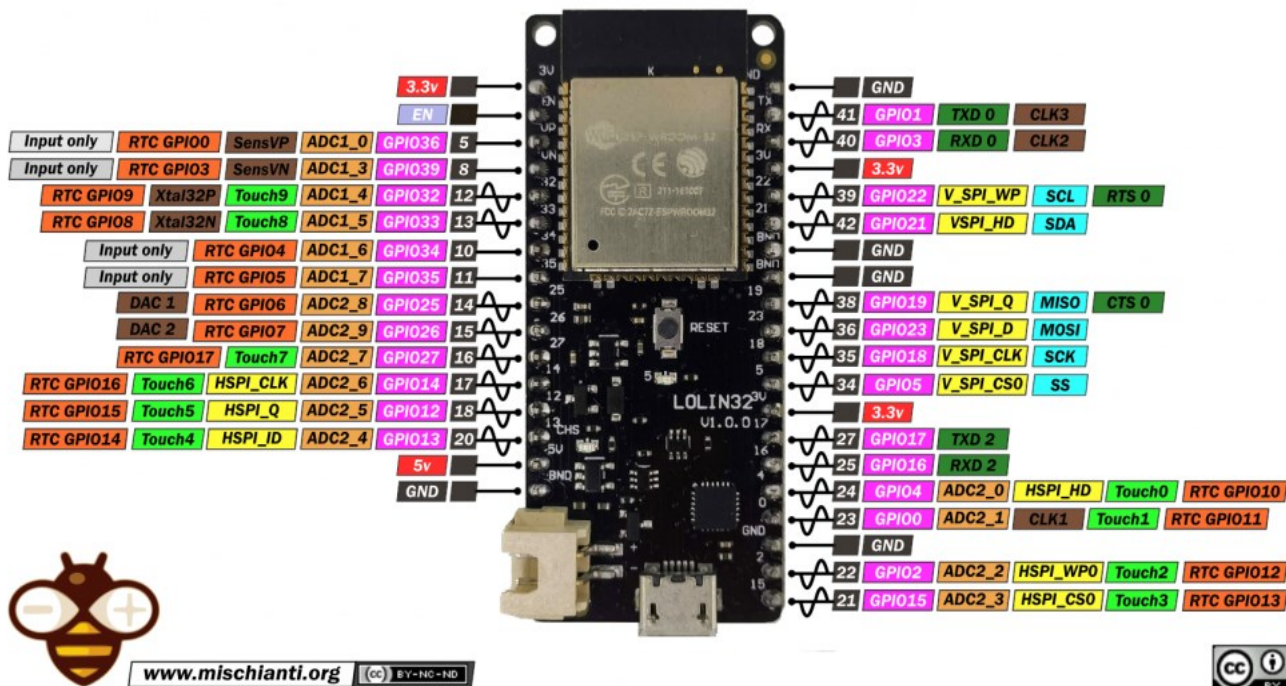
Následující obrázek znázorňuje elektronické schéma modulu.



Obrázek 14: Elektronické schéma modulu operačního zesilovače INA240EVM [26]

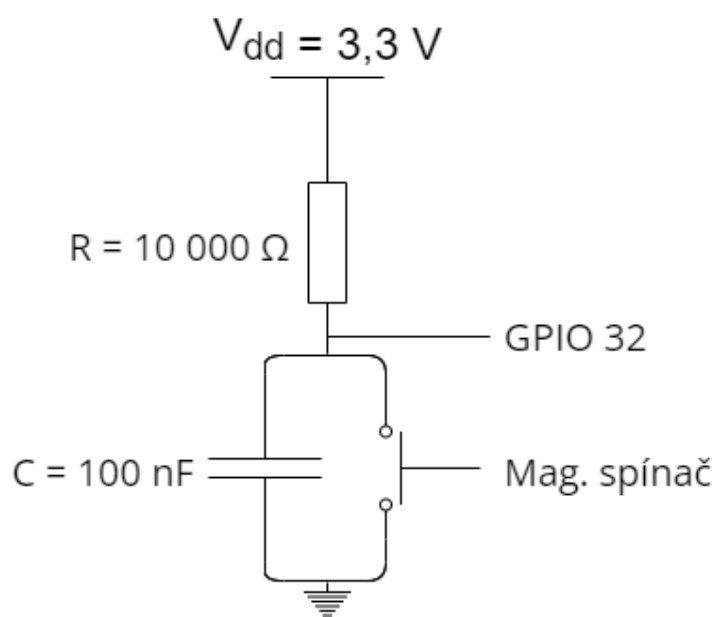
Samotná součástka je v modulu doplněna dvěma diodami  $D1$  a  $D2$ , které omezují vstupní napětí svorek  $V_{IN+}$  a  $V_{IN-}$  na 70 V. Dále jsou obsaženy dva kondenzátory  $C1$  a  $C3$  s kapacitou 100 nF respektive 1000 nF, sloužící k filtraci napájecího napětí  $V_s$ . Desku lze osadit rezistory  $R1$  a  $R2$  a kondenzátorem  $C2$ , čímž lze vytvořit filtr vstupních napětí  $V_{IN+}$  a  $V_{IN-}$ .  $R3$  lze osadit a využít jako bočník pro případ měření a zesilování proudu. Resistory  $R4$  až  $R7$  lze nastavit referenční napětí  $V_{REF1}$  a  $V_{REF2}$ . V mém zapojení bude  $V_{IN-}$  nulové, tedy budu chtít nastavit obě referenční napětí na 0 V. Toho docílím odpájením osazeného  $R4$  a zkratováním svorek pro  $R5$ . Operační zesilovač je napájen napětím v rozmezí 2,7–5,5 V a maximální proudový odběr činí 2,4 mA. Offset vstupního napětí činí maximálně  $\pm 0,025$  mV a jeho změna s teplotou maximálně 250 nV/°C [26][27]. Výstup operačního zesilovače je pak zpracován analog – digitálním převodníkem modulu *LoLin 32 ESP-WROOM-32 2.4 Ghz Dual-Mode WiFi+Bluetooth*, *CP2102* výrobce Espressif, který je založen na mikroprocesoru ESP-32, viz následující obrázek.

## ESP32 WeMos LOLIN32 PINOUT



Obrázek 15: Modul ESP32 LoLin32 s popisem jednotlivých pinů [28]

Tento čip poskytuje analogové a digitální vstupy. Modul dále zahrnuje možnost napájení jednočláčkovou Lithium-iontovou či Lithium-polymerovou baterií o nominálním napětí 3,7 V [28]. Baterie je nabíjena prostřednictvím konektoru microUSB, který také slouží k nahrávání vytvořeného programu do modulu. Tento modul zároveň disponuje stabilním napětím 3,3 V, které bude použito pro napájení Wheatstoneova můstku. Dále bude napětí přivedeno na magnetický spínač, viz následující obrázek.



Obrázek 16: Elektronické schéma vytvořeného senzoru kadence

Magnetický spínač je připojen na vstupní pin mikroprocesoru GPIO (*General purpose input/output*, česky universální vstup/výstup), konkrétně na GPIO 32. Obvod dále obsahuje paralelně zapojený keramický kondenzátor o kapacitě 100 nF, který filtruje záchvěvy napětí, ke kterým dochází nedokonalostí sepnutí spínače, kdy jsou kontakty spojeny do určité míry postupně a nikoliv v nekonečně malém čase a úplně. Dále je obvod vybaven tzv. *pull-up* rezistorem, který zajišťuje definovanou úroveň napětí při sepnutém i otevřeném spínači. Při nesepnutém spínači (nepůsobí magnetická síla) je na pinu napětí 3,3 V, což vnitřní logika mikroprocesoru vyhodnotí jako logickou 1. V případě sepnutí procházejícím magnetem se na GPIO 32 objeví napětí 0 V, tedy logická 0.

Na piny GPIO tohoto modulu bude vyveden výstup tenzometrického můstku (GPIO 36) a magnetického spínače (GPIO32).

Hodnoty získané z můstku a akcelerometru budou dále zpracovány pomocí algoritmu implementovaného do čipu ESP32, kde tyto hodnoty budou periodicky vzorkovány a z těchto vzorků bude poté vypočítán odhad působící síly a frekvence šlapání (kadence), z nichž bude následně vypočten výkon přenášený cyklistou na pedály jízdního kola.

### **2.3 Bezdrátový Bluetooth přenos hodnot**

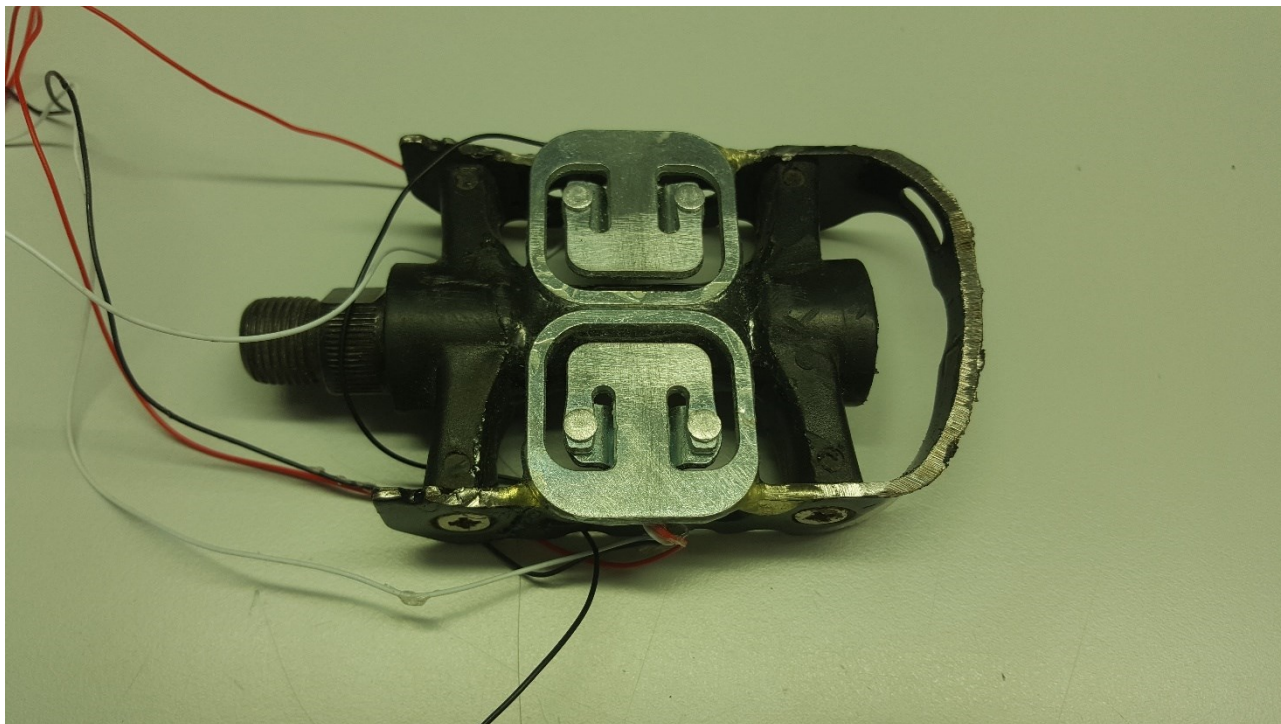
Součástí modulu *LoLin32* jsou WiFi a Bluetooth moduly [28]. Bluetooth modul disponuje výrazně nižší spotřebou než WiFi a samotný přenos dat do chytrého telefonu, kde budou pomocí volně dostupné mobilní aplikace *Serial Bluetooth Terminal* zobrazeny, je tak výrazně méně energeticky náročný [29]. Telefon může být umístěn například na řídítkách jízdního kola, odkud lze snadno sledovat získaná data.



## 3 Realizace měřícího zařízení

### 3.1 Lepení tenzometrických můstků na pedál

Váhové senzory jsou nalepeny na pryskyřičný pedál s ocelovou vnější konstrukcí tak, že se vždy opírají jednou stranou o pryskyřičnou část nad osou pedálu a druhou stranou o ocelovou kostru, viz obr. 17. Toto umístění se jeví vzhledem k nerovnosti povrchu pedálu jako nejstabilnější.



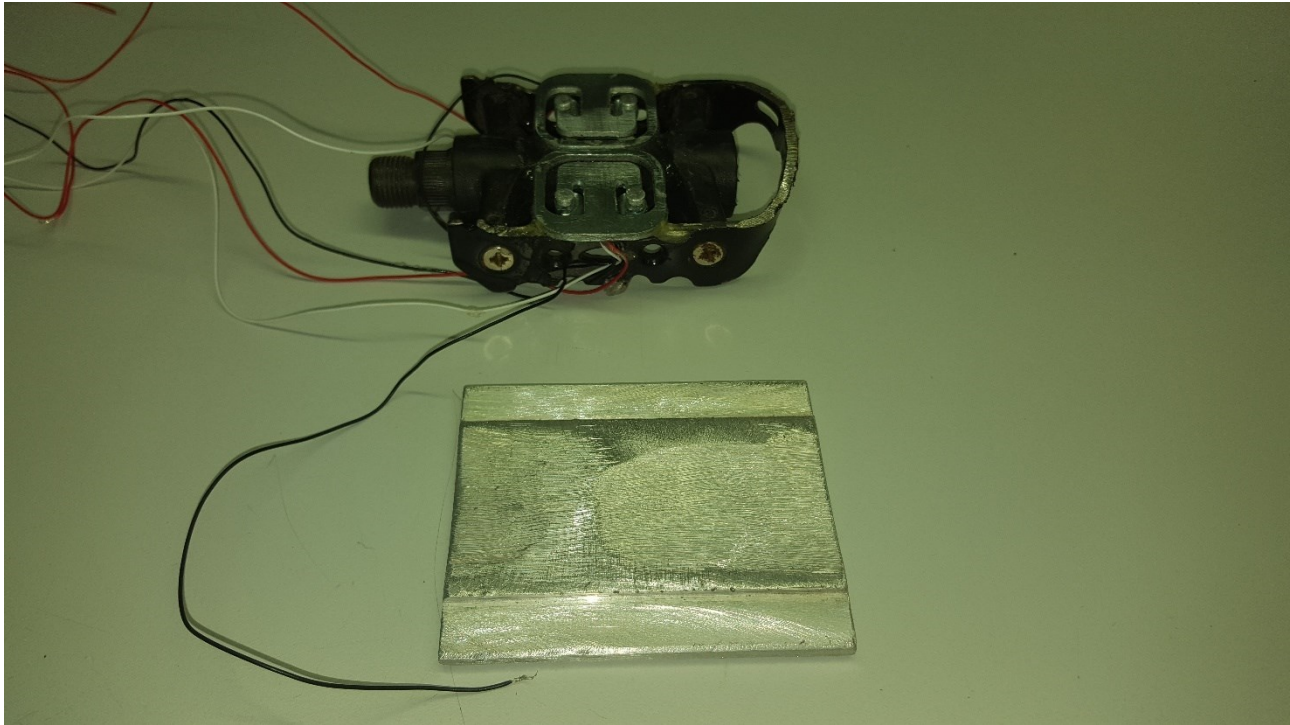
Obrázek 17: Pokusný pedál s přilepenými váhovými senzory

Pedál byl dále obroušen od nežádoucích hrotů a lepené plochy pedálu zdrsněny smirkovým papírem. Vzhledem k pozinkování můstků bylo nutné je také obrousit, protože na holou ocel má lepidlo tendenci lépe přilnout.

Jako lepidlo je použito dvousložkové epoxidové lepidlo *Loctite 3430*, které bylo také zapůjčeno již zmíněnou *Laboratoří pro vývoj a realizaci*. Vzhledem k nemožnosti zjistit přesný typ pryskyřice, z které je pedál vyroben, bylo použito lepidla za nejistých výsledků.

### **3.2 Lepení hliníkové destičky na tenzometrické můstky**

Pro rovnoměrný přenos síly z chodila cyklisty na váhové senzory je na ně ve čtyřech bodech pomocí stejného epoxidového lepidla nalepena hliníková destička o podobných rozměrech, jako je velikost pedálu, viz následující obrázky.



*Obrázek 18: Připravený pedál s váhovými senzory a kontaktní hliníková destička*

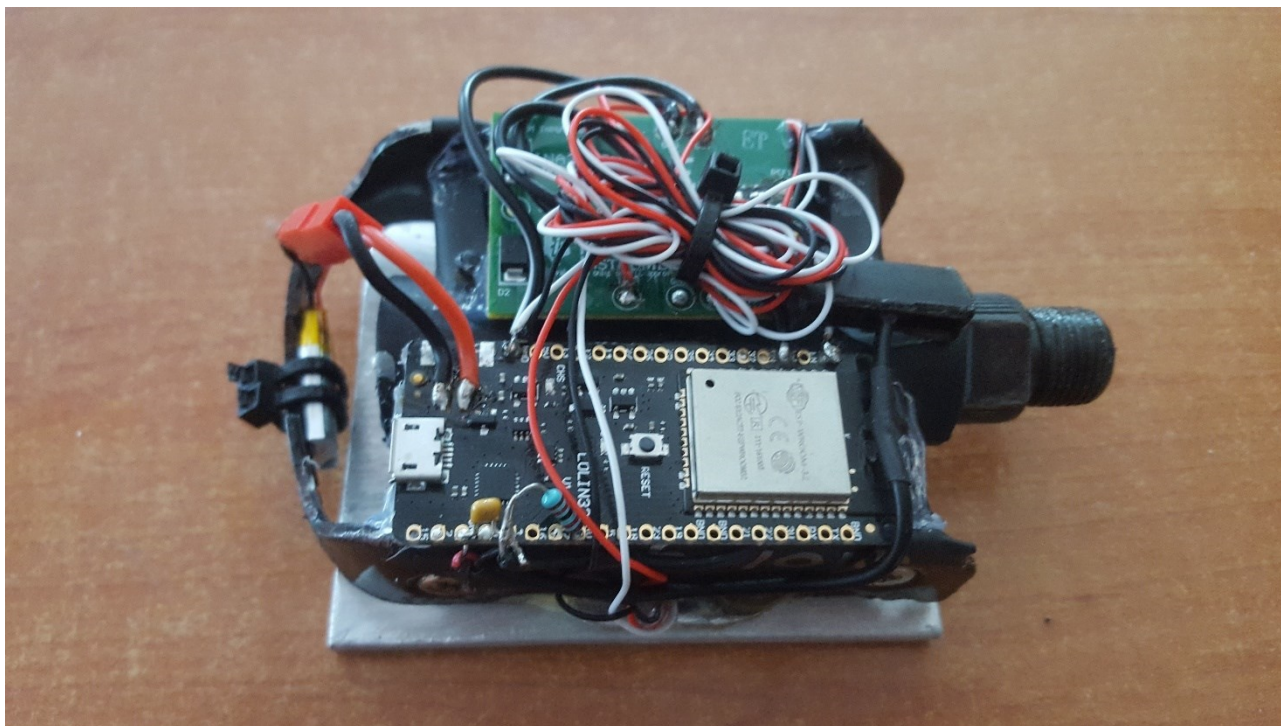


*Obrázek 19: Pedál s nalepenou destičkou*

Díky povaze uvedeného zapojení tenzometrického můstku nezáleží na konkrétní poloze chodidla na destičce. Pokud bude síla působit více v její přední či zadní části, tedy na jeden senzor bude připadat větší síla než na druhý, bude výstupní napětí můstku stejné, jako by na ně byla síla rozložena rovnoměrně.

### 3.3 Zapájení a instalace elektroniky

Na pedál je stahovacími páskami instalován Lithium – polymerový akumulátor o nominálním napětí 3,7 Voltů, který napájí modul *LoLin32*. Dále je tavicí pistolí a kyanakrylátovým lepidlem přilepen modul operačního zesilovače *INA240A4*, samotný modul *LoLin32* a magnetický spínač a vše je pomocí drátů a páječky spojeno. Na osu pedálu je dále instalován neodymový magnet, který při každé otáčce sepne spínač. Zkompletované měřicí zařízení znázorňuje následující fotografie.

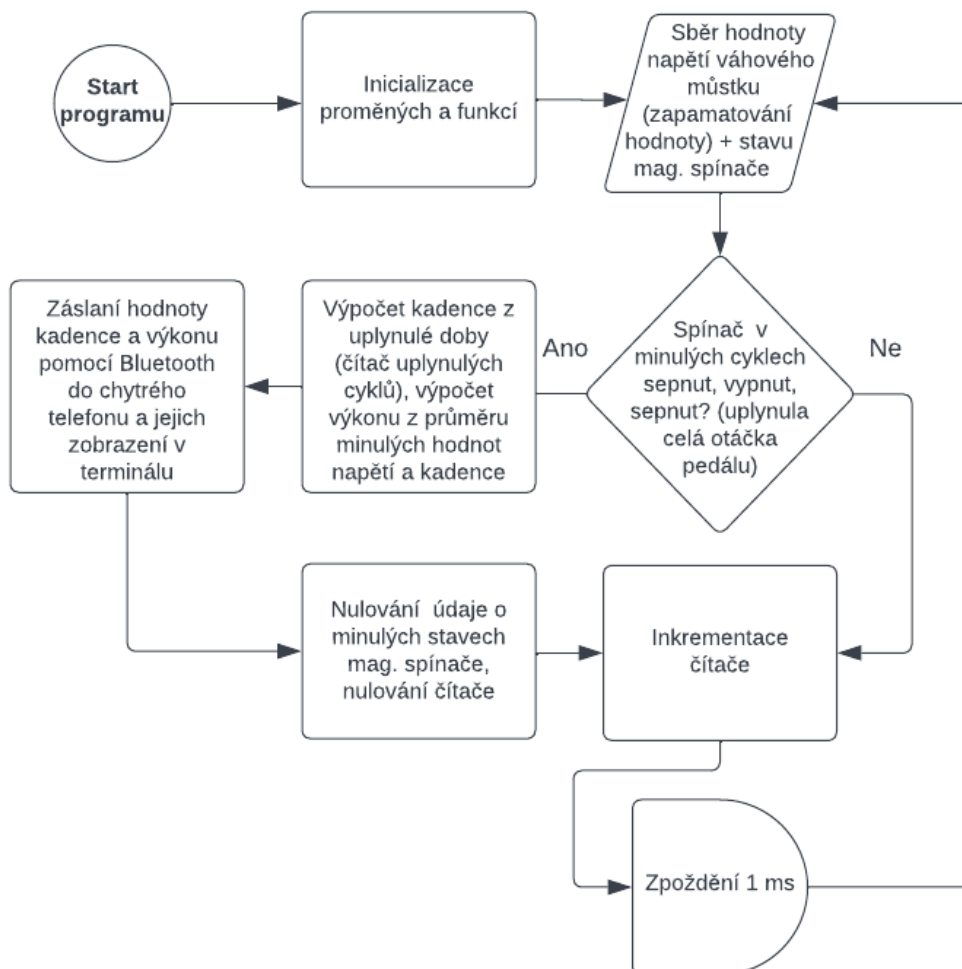


Obrázek 20: Zkompletované měřicí zařízení

Měřicí zařízení – wattmetr – váží 322 gramů. Ve srovnání se 151 gramy (viz kapitola 2.5), jenž váží obyčejný, neměřicí pedál firmy Assioma *Favero*, jde o více než dvojnásobnou hmotnost.

### 3.4 Zpracování měřených dat modulem LoLin32

Vyhodnocení naměřených dat zajišťuje program, jehož zjednodušený průběh znázorňuje následující diagram. Program je součástí práce na příloženém CD.



Obrázek 21: Blokový diagram kódu pro zpracování měřených dat

Programování využitého mikroprocesoru probíhá ve vývojovém prostředí Arduino IDE. Toto prostředí nabízí využití široké škály tzv. knihoven, které poskytují velmi zjednodušené používání předdefinovaných funkcí. V kódu pro řízení wattmetru je využita knihovna *BluetoothSerial.h*.

Nejprve je pomocí funkce *BluetoothSerial* „název“ aktivován Bluetooth modul, ke kterému se dále v kódu přistupuje přes jeho název. Následně je pomocí funkce „název“.begin udána rychlost přenosu informací přes toto sériové rozhraní.

Následuje nadefinování několika proměnných, do kterých se ukládají hodnoty výstupního napětí tenzometrického můstku, logická úroveň odpovídající napětí na magnetickém spínači či jiné pomocné proměnné.

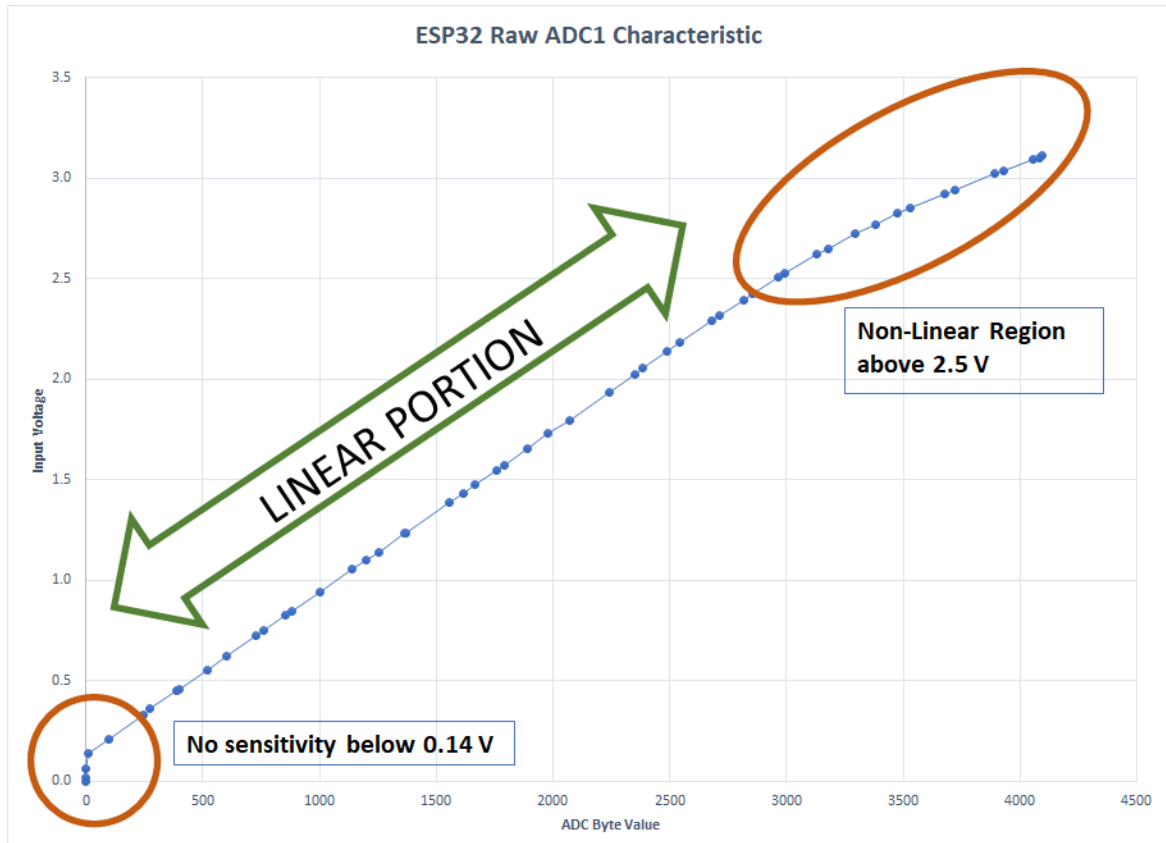
Pomocí funkce *digitalRead* je do proměnné uložen stav odpovídající buď vysoké (3,3 V pro modul LoLin32) či nízké (0 V) úrovni napětí na pinu GPIO 32, kam je připojen výstup magnetického senzoru.

Funkce *analogRead* zase ukládá výsledek analog-digitálního převodu napětí na pinu GPIO 36, kam je vyvedeno výstupní napětí tenzometrického můstku. A/D převodník tohoto modulu je 12bitový a rozsah vstupního napětí je 0–3,3 V. Výstupem funkce *analogRead* je číselná hodnota, odpovídající poloze vstupního napětí na intervalu 0–3,3 V, avšak vyjádřená v intervalu 0–4095 (12bitů = 4095 různých hodnot). Přepočítání na hodnotu reálného napětí je později v kódu provedeno dle vzorce

$$U_{IN} = 3,3 \cdot \frac{x}{4095} \quad (6)$$

kde  $U_{IN}$  označuje napětí (ve voltech) na vstupu A/D převodníku a  $x$  je výstup funkce analog-digitálního převodu (bezrozměrné).

Zmíněný A/D převodník bohužel není ideální a vyskytuje se u něj tzv. *offset napětí*, kdy je výsledek převodu nenulový až při vstupním napětí  $U_{IN} = 0,15 \text{ V}$  (konkrétní hodnota experimentálně zjištěna), viz graf níže. Toto je kompenzováno v přepočtu digitální hodnoty na napětí. Křivka A/D převodu je lineární až do napětí  $U_{IN} = \text{cca } 2,5 \text{ V}$ , nicméně při pokusném zatížení se převáděné napětí pohybovalo maximálně do cca 1,28 V, tedy tuto nelinearitu není třeba brát v potaz.



Obrázek 22: Převodní charakteristika A/D převodníku modulu LoLin32 [30]

Jak bylo měřením digitálním multimetrem zjištěno, výstup tenzometrického můstku není za nulové působící síly  $F$  nulové napětí, jak by tomu teoreticky mělo být. Po zesílení modulem operačního zesilovače *INA240A4* je toto napětí zhruba 0,15 V, což musí být ve výpočtu síly z tohoto napětí bráno v potaz a kompenzováno.

Pro přepočítání napětí  $U_{IN}$  na sílu  $F$ , která jej vyvolala, je vzhledem k předpokládané lineární povaze váhových sensorů, operačního zesilovače a A/D převodníku nutné zjistit koeficienty  $a$  a  $b$  rovnice přímky

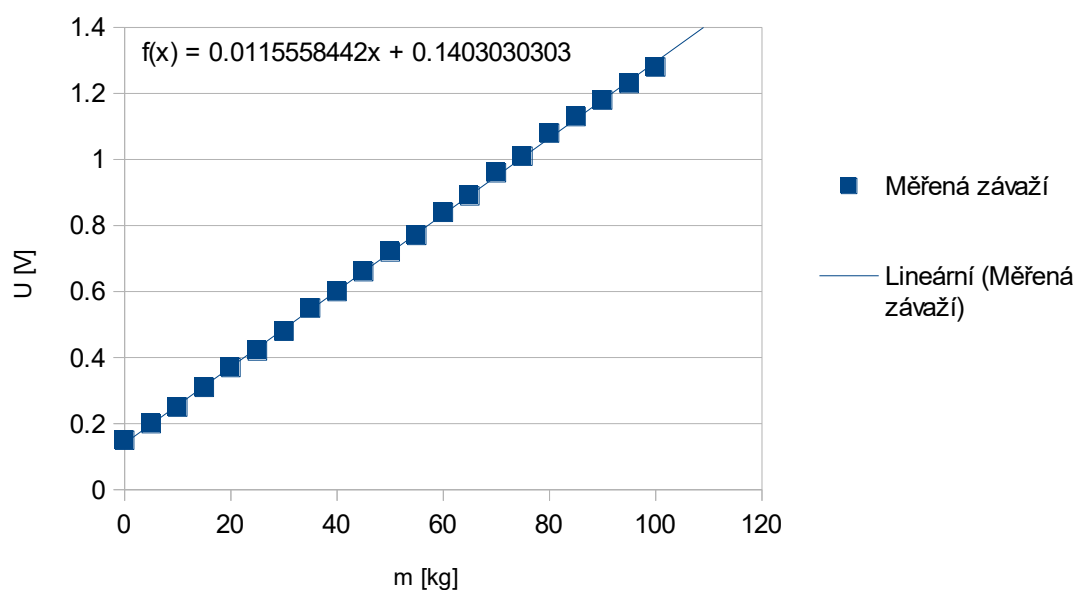
$$y = a \cdot x + b$$

(7)

která celkové charakteristice převodu působící síly  $F$  na napětí  $U_{IN}$  odpovídá.



Z toho důvodu bylo provedeno měření, kdy bylo na váhové senzory postupně působeno závažím o hmotnosti  $m$  (v kilogramech), která nabývá hodnot 0–100 kg s krokem 5 kg a vždy zapsáno naměřené napětí. Působící síla  $F$  je pak úměrná hmotnosti  $m$  pouhým vynásobením gravitační konstantou  $g$ . Naměřená data byla zadána do programu *Microsoft Excel*, který vypočítal koeficienty  $a$  a  $b$  regresní přímky.



Graf 1: Závislost výstupního napětí  $U$  op. zesilovače na aplikované hmotnosti  $m$

Jak je z grafu patrné, koeficient  $a$  je přibližně 0,0116 a  $b$  přibližně 0,14.  
Pak

$$U_{IN} = 0,0116 \cdot m + 0,14 \quad (8)$$

Tedy

$$m = \frac{U - 0,14}{0,0116} \quad (9)$$

Samotná síla  $F$  se pak vypočítá dle vzorce

$$F = g \cdot m = g \cdot \frac{U - 0,14}{0,0116} = 9,81 \cdot \frac{U - 0,14}{0,0116} \quad (10)$$

kde  $g$  je konstanta gravitačního zrychlení, která je rovna přibližně  $9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ .

Sběr a výpočet dat probíhá ve funkci *loop*, která se neustále opakuje s periodou  $T = 1 \text{ ms}$ . Při každém běhu cyklu se aktualizuje proměnná ukládající výstupní napětí můstku a za využití jednoduchého algoritmu program zjišťuje, zda došlo k plné otáčce pedálu kolem své osy. Pokud se tak stane, pomocí čítače, který se inkrementuje při každém cyklu, je vypočítána uplynulá doba a frekvence otáčení. Také je vypočtena průměrná hodnota výstupního napětí můstku za tuto periodu a z něj průměrná hodnota aplikované síly. Dle vzorce

$$P = 2 \cdot F \cdot v = \frac{4 \cdot \pi \cdot F \cdot r}{T} \quad (11)$$

kde  $v$  je rychlost pohybu působíště síly (osy pedálu) a  $r$  označuje vzdálenost osy pedálu od osy středového složení jízdního kola je vypočten průměrný výkon  $P$ , působený nohama cyklisty na kolo během jedné rotace pedálu kolem své osy. Sílu  $F$  je nutné násobit dvěma, neboť je předpokládáno, že druhá noha působí za jednu otáčku stejnou průměrnou silou.

Následující fotografie znázorňuje již instalované měřicí zařízení – pedál.

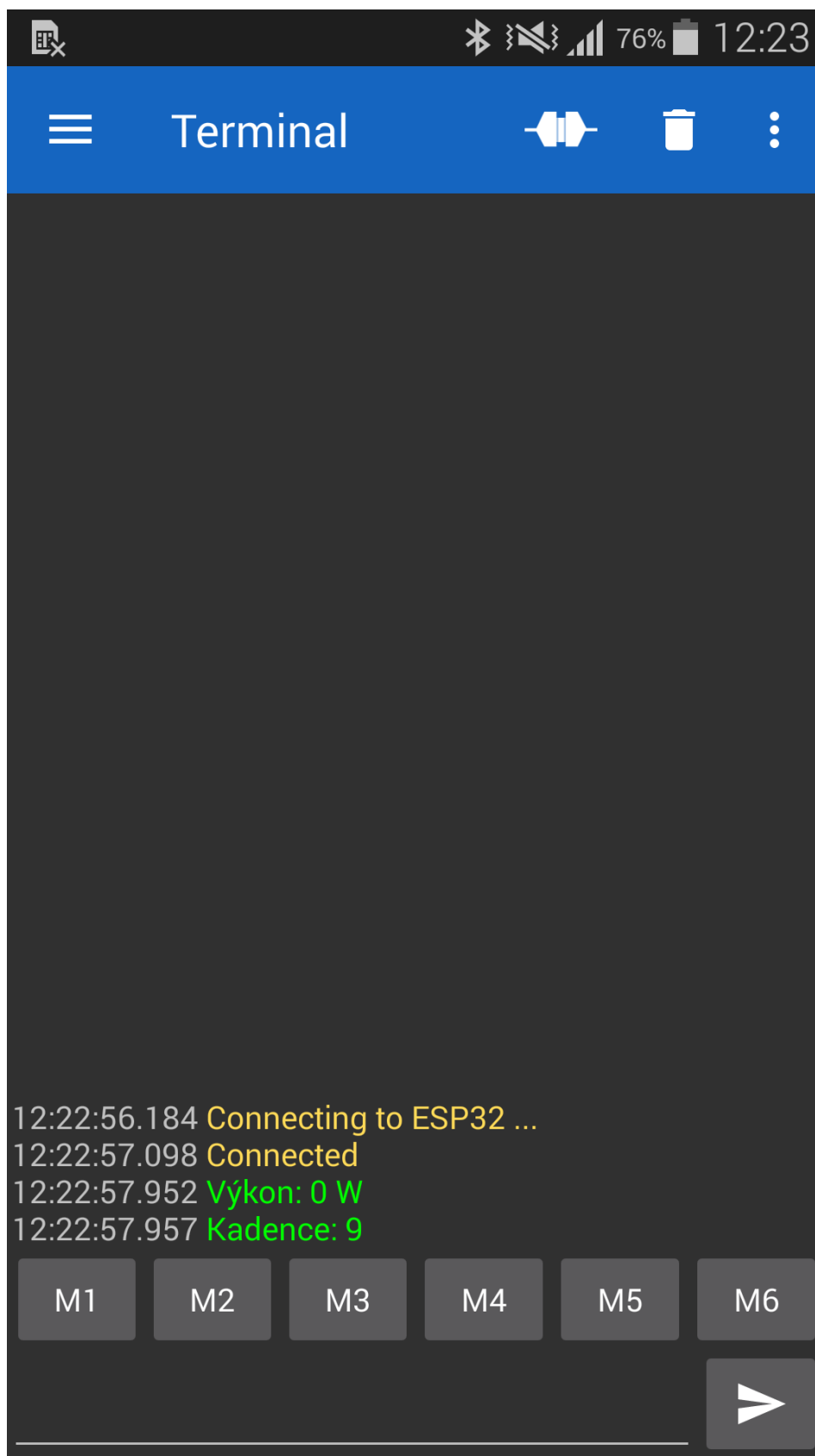


*Obrázek 23: Měřicí zařízení nainstalované klíče silničního kola*

### **3.5 Testování měřícího zařízení**

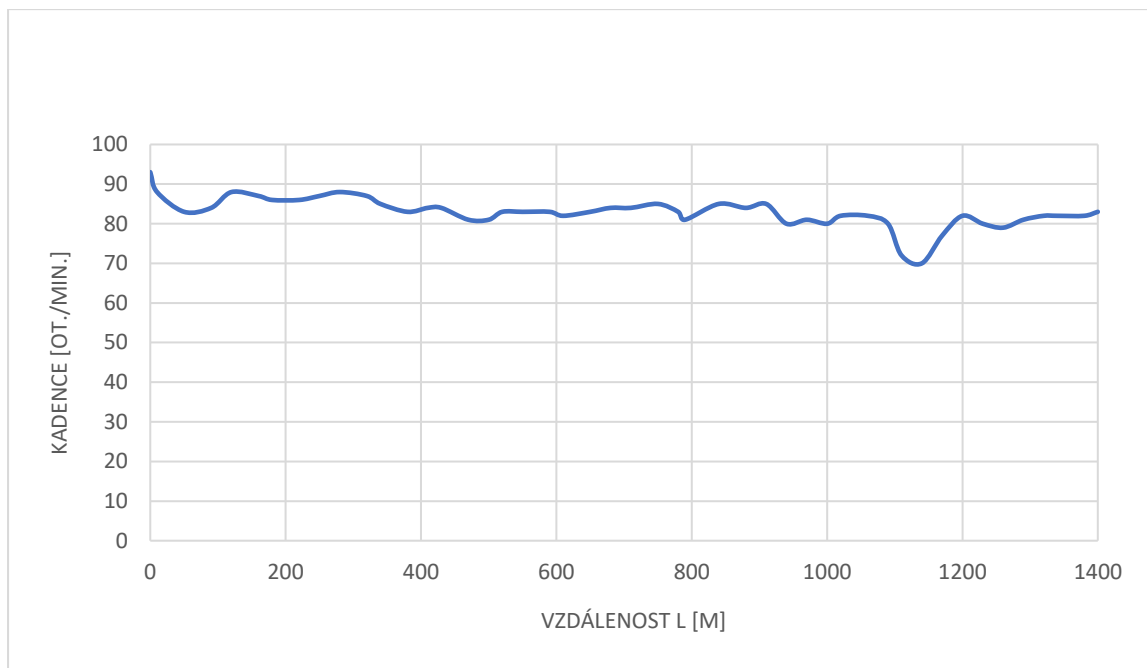
Zrealizované zařízení bylo otestováno. Pro porovnání výsledků experimentu bylo zvoleno jeho provedení rovněž s cyklopočítačem značky Sigma BC 23.14, který disponuje také možností využití software *Sigma Data Center*, který umožňuje shlednutí průběhu snímaných veličin na osobním počítači. Toto zařízení, jak již bylo popsáno v kapitole 2.8, disponuje zobrazením výkonu vynaloženého cyklistou. Jím poskytnuté údaje jsou z autorovi zkušenosti relevantní převážně ve velkém stoupání a při minimální hodnotě rychlosti větru. Proto bylo pro testování užito zhruba 1400 metrů dlouhé úseku s průměrným stoupáním 5 % a testovací jízda byla provedena v pozdě večerních hodinách, kdy bývá hodnota rychlosti větru zpravidla nižší, než během dne. Realizované měřící zařízení – wattmetr – bylo nainstalováno na levou kliku silničního kola, na kterém byl současně instalován také zmíněný cyklopočítač.

Data z pedálového měřiče byla odečítána z aplikace v chytrém telefonu, viz následující obrázek.



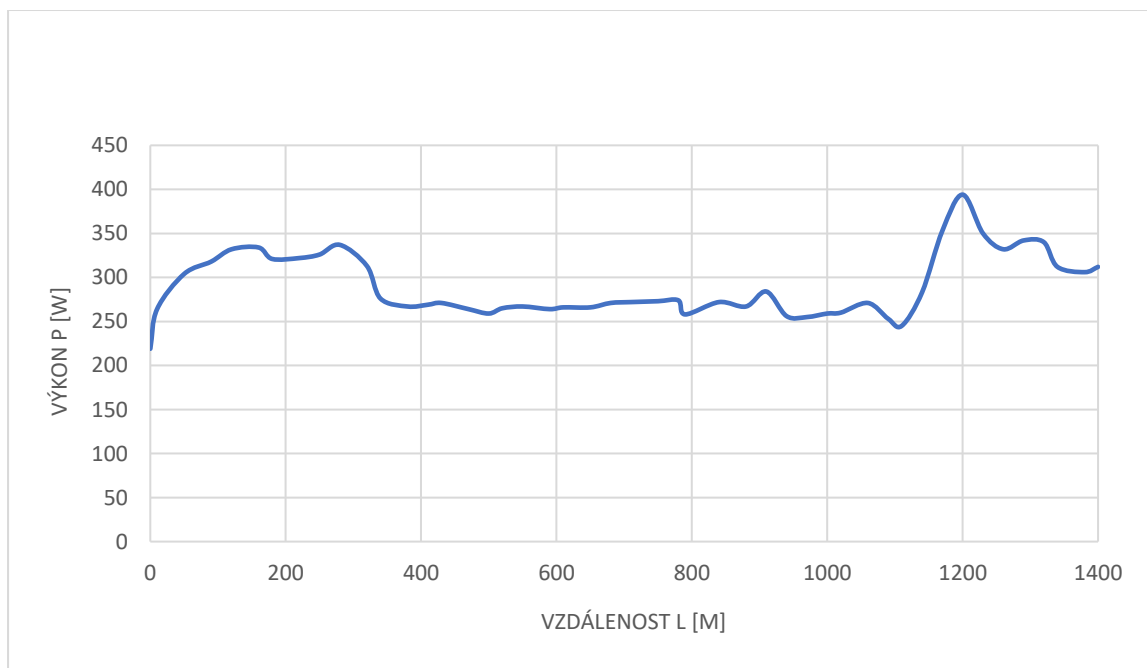
Obrázek 24: Snímek aplikace Bluetooth Serial Terminal s přijatými daty z wattmetru

Data z cyklopočítače byla odečítána ze zmíněného programu *Sigma Data Center*. Následující graf znázorňuje průběh odečtených hodnot kadence při experimentální jízdě měřené cyklopočítačem. Průměrná hodnota kadence činila 83 otáček za minutu.



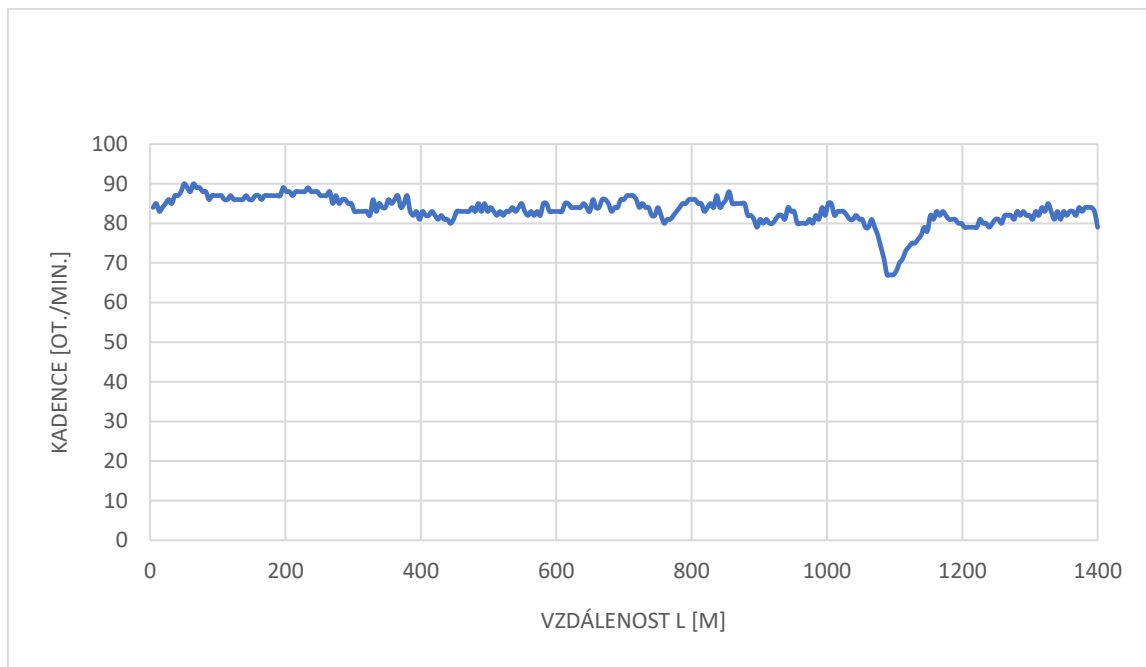
Graf 2: Průběh kadence při jízdě – BC 23.16

Další graf ukazuje průběh výkonu vypočítávaný stejným zařízením. Jeho průměrná hodnota činila 290 W.



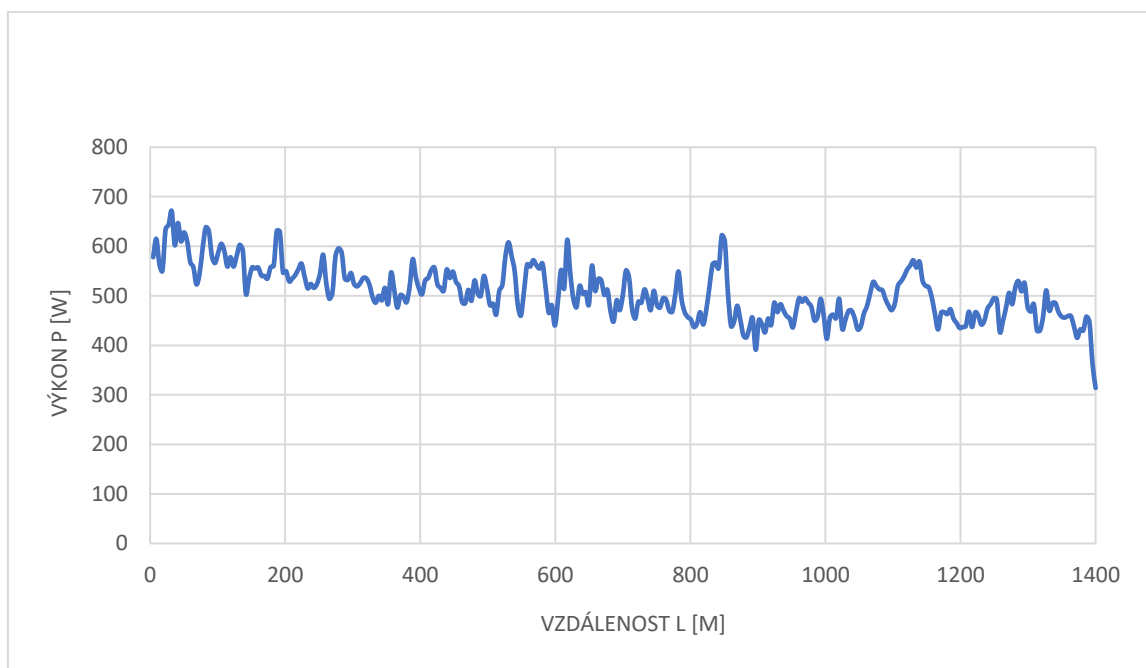
Graf 3: Průběh výkonu při jízdě – BC 23.16

Průběh kadence měřený pokusným pedálovým wattmetrem znázorňuje následující graf. Průměrná hodnota změřené kadence byla stejně jako v předchozím případě 83 otáček za minutu.



Graf 4: Průběh kadence při jízdě – pokusný wattmetr

Čtvrtý graf zobrazuje průběh výkonu  $P$  změřeného pedálových wattmetrem. Jeho průměrná hodnota činí 508 Wattů.



Graf 5: Průběh výkonu při jízdě – pokusný wattmetr

### 3.6 Zhodnocení výsledků experimentu

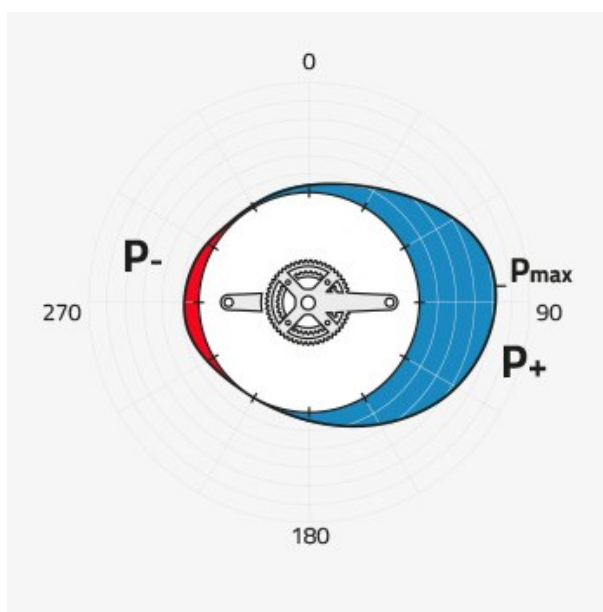
Oba uvedené grafy kadence jsou si až drobné záchvěvy (způsobené větším rozlišením dat z pedálového měřiče) ve většině průběhu poměrně podobné. Průměrná hodnota kadence získaná z obou zařízení činí stejnou hodnotu a to 83 otáček za minutu, což považuji za velmi dobrý výsledek.

Z grafů výkonu  $P$  je patrný jejich podobný průběh, bohužel hodnoty změřené pedálovým měřičem jsou výrazně nadsazené, průměrná hodnota získaná z pedálového wattmetru činí 508 Wattů, avšak cyklopočítač tuto hodnotu odhaduje na 290 W.

Při zkoumání možných důvodů selhání měření výkonu byla pro ověření správného výpočtu výkonu na pedál staticky aplikována síla  $F = 20$  N a otáčeno osou s kadencí 102 otáček za minutu. Aplikace v mobilním telefonu zobrazila hodnotu 67 W, dle teoretického výpočtu by tato hodnota měla být 72 W, což lze považovat za poměrně dobrý výsledek, ze kterého lze usuzovat, že pedál z aplikované síly a kadence výkon vypočítává relativně dobře.

Je nutné zmínit, že určité zkreslení změřeného výkonu může také způsobovat jistá deformační setrvačnost váhových senzorů, způsobená jejich mechanickým provedením, kdy se napnutí integrovaných tenzometrů nemusí měnit tak rychle, jak se mění působící síla a tím je vytvářena vlastní chyba senzorů, nicméně bližší informaci o takové chybě jsem v technických parametrech výrobku nenalezl.

Jako další možná příčina se ukázalo integrování hodnot výkonu, kdy je zřejmé, že k vydávání užitečného výkonu bude docházet jen v části otáčky kliky, neboť mimo samotný záběr nohy, kdy je pedál na klice v přední poloze, je nutné uvažovat i zatížení nohy při návratu pedálu do horní polohy, viz následující obrázek.

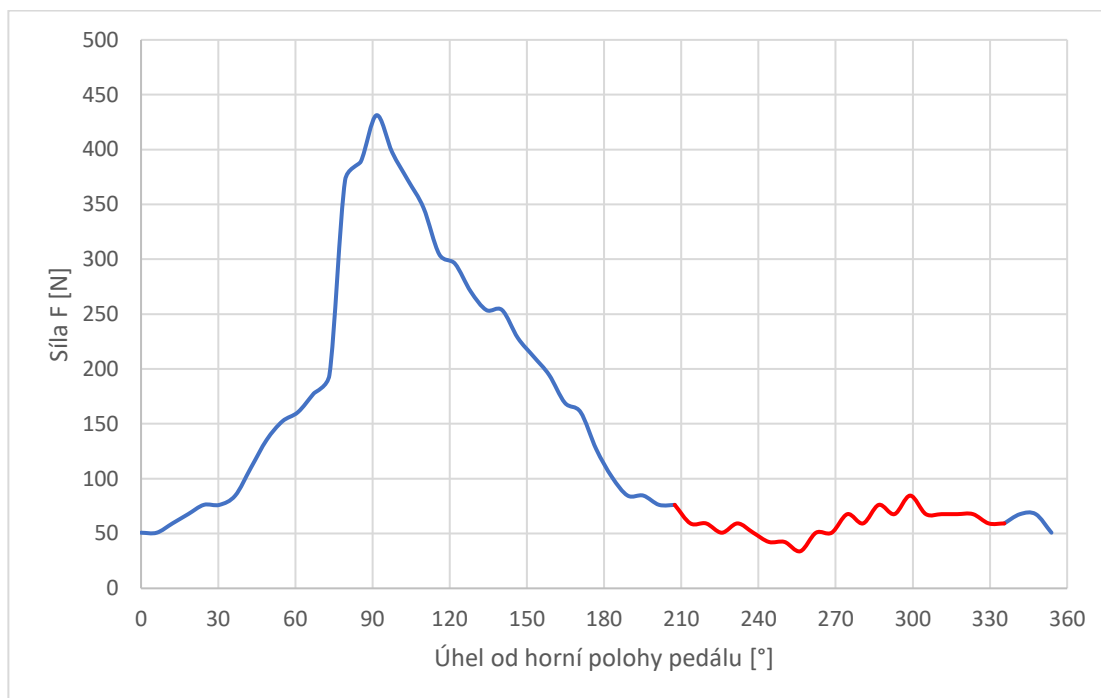


Obrázek 25: Rozložení výkonu během záběru do pedálu [31]



Modře zbarvená část grafu ( $330\text{--}210^\circ$ ) znázorňuje výkon přenesený do řetězu kola ( $P+$ ), červená část ( $210\text{--}330^\circ$ ) značí výkon, kdy je působeno proti záběru druhé nohy ( $P-$ ), tedy se výkon do pohonu nepřenáší a naopak zeslabuje působení druhé nohy.

Pro analýzu tohoto jevu byla změřena síla, působící na pedál v průběhu celého 360stupňového pohybu kliky kolem středového složení a jednotlivé části průběhu zabarveny pro indikování fází z minulého obrázku, viz následující graf.



Graf 6: Průběh síly při záběru do pedálu

Z grafu je patrné, že největší síly je dosahováno při úhlu zhruba 90° mezi klikou a vertikálním směrem při přední poloze pedálu. Po dosažení polohy zhruba 210° však síla zůstává nenulová až do polohy zhruba 330° a v této fázi působí proti záběru druhé nohy.

Pro zlepšení přesnosti měření výkonu by bylo nezbytné tento jev brát v úvahu a kompenzovat tento zbytečný výkon ve výpočetním řetězci. Jak je vidět z grafu výše, vratná fáze šlapání probíhá v úhlu zhruba 120°, záběrová v úhlu zhruba 240°, tedy záběrová fáze je ovlivněna vratnou fází v poloviční délce svého průběhu.

Při pokusu o korekci hodnoty průměrného výkonu, získanou provedeným experimentem, je předpokládáno, že při různých kadencích a silách šlapání je průměrná hodnota síly  $F$  ve vratné fázi záběru nohy stále stejná. Při využití výrazu

$$P_{vrat.} = 2.F.v = \frac{4.\pi.F.r.f}{60}$$

(12)

kde  $v$  značí rychlost pedálu, získáme za znalosti délky kliky  $r = 0,1725$  m a hodnoty kadence  $f$  (v otáčkách za minutu) průměrnou hodnotu výkonu  $P_{vrat.}$  ve vratné fázi.

Správná hodnota výkonu by pak byla určena průměrným výkonem změřeným pedálem během záběrové (v grafu modré) fáze a odečtením poloviny změřené průměrné hodnoty výkonu během vratné (v grafu červené) fáze jako kompenzace faktu, že průměrný přenášený výkon v záběru je pedálovým měřičem nadsazen o polovinu této hodnoty. Při znalosti nesprávně vypočítané celkové průměrné hodnoty výkonu  $P_{nekor.}$ , ve které je však ještě navíc nekorektně započítán průměrný výkon ve vratné fázi, získáme korektní hodnotu přenášeného výkonu pomocí výrazu

$$P_{kor.} = P_{nekor.} - P_{vrat.} \quad (13)$$

neboť je nutné odečíst zmíněnou polovinu průměrné hodnoty výkonu ve vratné fázi dvakrát. Při využití změřených hodnot síly ve vratné fázi (tedy průměrné hodnoty  $F$ ), průměrné hodnoty kadence při pokusu  $f = 83$  otáček za minutu a vzorce (13) získáme

$$P_{vrat.} = \frac{4 \cdot \pi \cdot F \cdot r \cdot f}{60} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 62,6 \cdot 0,1725 \cdot 83}{60} = 187,6 \text{ W} \quad (6)$$

Pak správná hodnota výkonu činí

$$P_{kor.} = P_{nekor.} - P_{vrat.} = 508 - 187,6 = 320,4 \text{ W.} \quad (7)$$

Při novém porovnání s průměrným výkonem změřeným cyklopočítačem, kdy byla získána hodnota 290 W, nyní získáváme poměrně relevantní hodnotu výkonu, kdy rozdíl změřených hodnot činí zhruba 10 %, což lze vzhledem k nejasné přesnosti vypočítávání výkonu cyklopočítačem považovat za uspokojující odchylku tohoto amatérského měřicího zařízení. Dalšího zlepšení přesnosti by se dalo dosáhnout použitím profesionálního wattmetru jako referenčního zařízení a také proměřením dynamických vlastností tenzometrického váhového senzoru.

Během provedeného experimentu nedošlo k žádnému poškození měřicího zařízení, což hodnotím vzhledem k jeho poměrně křehké konstrukci za velmi pozitivní až překvapivé, neboť zařízení obstálo i v testu maximální výkonu, tzv. *sprintu*, uspokojivě a žádná jeho část se od celku neoddělila – nedošlo k jeho destrukci. Z tohoto důvodu navrhovaný měřič může být z hlediska mechanické funkčnosti samotného komponentu – pedálu – použit.

Odběr zařízení činí 75 mA, což lze považovat za poměrně velký odběr, který by bylo třeba v případě dlouhodobého používání snížit, neboť by baterie musela být poměrně velká, což není vzhledem k velmi omezenému prostoru pedálu vhodné. Za tímto účelem by se mohl například optimalizovat výpočetní algoritmus, sestavit celý přístroj pouze z nutných součástek (nikoliv využít hotový modul) či vybrat vhodnější součástky.

### 3.7 Cenová kalkulace měřícího zařízení

Následující tabulka znázorňuje cenu jednotlivých materiálních položek, které byly k experimentu využity včetně jejich součtu. V případě využití vlastního či darovaného materiálu je do kalkulace zapsán odhad hodnoty použitého materiálu. Kalkulace neobsahuje náklady na vývoj a práci.

Tabulka 2: Kalkulace materiálních nákladů na stavbu měřícího zařízení

<i>Položka:</i>	<i>Cena:</i>
Pedál jízdního kola	Vlastní – 100 Kč
Modul <i>LoLin32</i>	238 Kč
Modul op. zesilovače TI <i>INA240 EVM</i>	Darován – 157 Kč
2 kusy váhového senzoru 50 kg	76 Kč (38 Kč /kus)
Mag. Senzor	Vlastní – 50 Kč
Neodymový magnet	Vlastní – 10 Kč
Li-pol akumulátor 3,7 V	Vlastní – 100 Kč
Epoxidové lepidlo <i>Loctite 3430</i>	Darováno – 100 Kč
Hliníková destička	Vlastní – 50 Kč
Kabeláž	Vlastní – 90 Kč
<b>Celkem</b>	<b>971 Kč</b>

Z finální kalkulace je zřejmé, že se jedná o uživatelsky finančně dostupný výrobek, který nabízí výrazně nižší cenu, než uváděné komerční výrobky, kdy nejlevnější z nich – Favero *Assioma Uno* – stojí 488 amerických dolarů (zhruba 11 400 korun). Nicméně je nutno zmínit, že kalkulace nepočítá s ostatními náklady, jako je práce či čas strávený na vývoji nebo provozní náklady pracoviště.

## Závěr

V této práci byl popsán princip fungování měřiče výkonu cyklistova šlapání, tzv. *wattmetr*, včetně jeho specifických zpracování dle umístění na bicyklu. U každé takové kategorie je uveden příklad produktu (pokud existuje komerční výrobek) včetně jeho základních vlastností, jako je cena, přesnost měření, výdrž baterie a aditivní hmotnost zařízení.

Dále byl navržen a následně sestaven a otestován vlastní prototyp amatérského wattmetru, který snímá údaj o frekvenci cyklistova šlapání, tzv. kadenci, a ze snímání síly, jakou cyklista působí na pedál kola, dále vypočítává aplikovaný výkon.

Měřič výkonu je mechanicky funkčním komponentem, který zachovává funkčnost původního komponentu, který nahrazuje. Dále není permanentně vázaný na konkrétní kolo a lze jej opakovaně instalovat. Wattmetr je napájen akumulátorem.

Při testování se ukázalo, že měřič snímá velmi dobře údaj o kadenci (ve srovnání s cyklopočítačem Sigma *BC 23.16*, kdy je naměřený údaj zaokrouhlený na celé číslo totožný). Přesnost snímání údaje o výkonu cyklistova šlapání se ukázala jako nedostatečně přesná, kdy při pokusné jízdě jím naměřený průměrný výkon činil 508 W, oproti tomu cyklopočítač tuto hodnotu odhadl na 290 W. Tato nepřesnost v měření výkonu je mimo jiné možné faktory do značné míry dána povahou záběru nohy do pedálu kola, kdy noha působí na pedál měřenou silou i při jejím návratu do horní polohy a tím působí proti záběru druhé nohy, což má za následek, že měřicí zařízení vyhodnotí větší hodnotu výkonu, než je skutečný výkon, který by se přenesl do pohybu jízdního kola s cyklistou a který odhaduje právě zmíněný cyklopočítač. Po provedení korekce hodnoty výkonu, získané pomocí pedálového měřiče, byla výsledná hodnota průměrného výkonu zhruba 320 W, což již lze z hlediska amatérského zařízení považovat za uspokojivý výsledek.

Při provedení změny způsobu vyhodnocování měřeného výkonu, který by bral v úvahu tuto skutečnost, použití profesionálního wattmetru jako referenčního měřiče či analýzou dynamických vlastností váhového senzoru je možnost velkého zlepšení přesnosti měření výkonu.

Pokusný wattmetr nenabízí alternativu za profesionální měřič s vysokou přesností měření, avšak při kalkulaci pouze materiálních nákladů je výrazně levnější než komerční výrobky a tak lze aplikované fyzické provedení měřiče doporučit amatérským cyklistům, kteří by aplikací vlastního optimalizovaného výpočetního kódu a věnováním svého času a práce získali možnost analyzovat průběh vlastního šlapání z hlediska výkonu a kadence.

## Seznam literatury

- [1] History. *SRM* [online]. ©2015. [cit. 20. 12. 2020]. Dostupné z: <http://www.srm.de/company/history/>
- [2] Power. *Toppr* [online]. [cit. 20. 12. 2020]. Dostupné z: <https://www.toppr.com/guides/physics/work-energy-and-power/power/>
- [3] Work and Power for Rotational Motion. *PressBooks* [online]. [cit. 4. 5. 2022]. Dostupné z: <https://pressbooks.online.ucf.edu/osuniversityphysics/chapter/10-8-work-and-power-for-rotational-motion/>
- [4] Matt Brett. Shimano FC-R9100-P Dura-Ace power meter chainset. *Road.cc* [online]. 5. června 2018 [cit. 20. 12. 2020]. Dostupné z: <https://road.cc/content/review/243022-shimano-fc-r9100-p-dura-ace-power-meter-chainset>
- [5] FC-R9100-P. *Shimano* [online]. ©2018. [cit. 20. 12. 2020]. Dostupné z: <https://bike.shimano.com/en-EU/product/component/duraace-r9100/FC-R9100-P.html>
- [6] Shimano Dura Ace FC R9100 P crankset with original powermeter. *eBay* [online]. ©2016. [cit. 4. 5. 2022]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/item/32833802280.html>
- [7] Ben Delaney. Inside: SRM's Colorado Springs assembly facility. *Bikeradar* [online]. Immediate Media Company Ltd, 23. 10. 2013 [cit. 20. 12. 2020]. Dostupné z: <https://www.bikeradar.com/features/inside-srms-colorado-springs-assembly-facility/>
- [8] SRM Origin Power Meter. *Road.cc* [online]. 18. 10. 2019 [cit. 4. 5. 2022]. Dostupné z: <https://road.cc/content/review/267659-srm-origin-power-meter>
- [9] SRM Origin Road Carbon Power Meter. *Power Meter City* [online]. ©2015–2016. [cit. 20. 12. 2020]. Dostupné z: <https://powermetercity.com/product/srm-origin-road-carbon-power-meter/>



- [10] SRM Origin Aluminium Power Meter 30 mm Crankset. *Bike-Components* [online]. [cit. 4. 5. 2022]. Dostupné z: <https://www.bike-components.de/en/SRM/Origin-Aluminium-Power-Meter-30-mm-Crankset-p70752/>
- [11] Easton Cinch Power Meter. *Winstanleys Bikes*. [online]. [cit. 4. 5. 2022]. Dostupné z: <https://winstanleysbikes.co.uk/easton-cinch-power-meter>
- [12] Easton CINCH Power Meter Spindle. *Power Meter City* [online]. ©2015–2016. [cit. 20. 12. 2020]. Dostupné z: <https://powermetercity.com/product/easton-cinch-power-meter-spindle/>
- [13] Transport Racks Bicycle Storage Bicycle Parking Cycling Infrastructure Trainers Rollers Indoor Cycles Virtual Reality Software Power Meters Computers Software. *SlidePlayer* [online]. ©2022. [cit. 4. 5. 2022]. Dostupné z: <https://slideplayer.com/slide/13935479/>
- [14] Matt Philips. How a PowerTap Hub Power Meter Works. *Bicycling* [online]. Hearst Magazine Media, Inc., 7. 5. 2014 [cit. 20. 12. 2020]. Dostupné z: <https://www.bicycling.com/bikes-gear/a20032149/powertap-gs-hub-revealed/>
- [15] PowerTap G3 power meter review. *BikeRadar* [online]. Our Media Ltd, ©2022. 25. září 2014 [cit. 4. 5. 2022]. Dostupné z: <https://www.bikeradar.com/reviews/training/power-meters/powertap-g3-power-meter-review/>
- [16] PowerTap G3C 24H SRAM/Shimano. *Starbike* [online]. [cit. 20. 12. 2020]. Dostupné z: [https://www.starbike.com/en/powertap-g3c/?currency=CZK&gclid=CjwKCAiAtK79BRAIEiwA4OskBoxFiw-OOJYzwxIG5rqNfy8MhrsQKI1ISW5-6xzL1J1wtKSWLZBxGRoC6dMQAvD\\_BwE](https://www.starbike.com/en/powertap-g3c/?currency=CZK&gclid=CjwKCAiAtK79BRAIEiwA4OskBoxFiw-OOJYzwxIG5rqNfy8MhrsQKI1ISW5-6xzL1J1wtKSWLZBxGRoC6dMQAvD_BwE)
- [17] Assioma – Technical Data Sheet. *Favero Electronics* [online]. [cit. 20. 12. 2020]. Dostupné z: [https://drive.google.com/file/d/0B2oavX\\_KEtF8aURFejN0SkNIQIE/view](https://drive.google.com/file/d/0B2oavX_KEtF8aURFejN0SkNIQIE/view)

- [18] Shop. *Favero Electronics* [online]. ©2015–2022 [cit. 4. 5. 2022]. Dostupné z: <https://cycling.favero.com/shop>
- [19] Luck shoe-based power meter – first look. *BikeRadar* [online]. Our Media Ltd, ©2022. 10. září 2014 [cit. 4. 5. 2022]. Dostupné z: <https://www.bikeradar.com/news/luck-shoe-based-power-meter-first-look/>
- [20] IB14: RPM2 Power Meter Shoe Insole Inserts Measure Force Everywhere. *BikeRumor*. [online]. ©2022 [cit. 4. 5. 2022]. Dostupné z: <https://bikerumor.com/ib14-rpm2-power-meter-shoe-insole-inserts-measure-force-everywhere/>
- [21] SIGMA BC 23.16 STS bezdrátová verze Cyklocomputer. *Mironet* [online]. [cit. 4. 5. 2022]. Dostupné z: <https://www.mironet.cz/sigma-bc-2316-sts-bezdratova-verze-cyklocomputer+dp327335/>
- [22] How Is Temperature Affecting Your Strain Measurement Accuracy?. *National Instruments* [online]. Aktualizováno 25. 8. 2020. [cit. 20. 12. 2020]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/innovations/white-papers/06/how-is-temperature-affecting-your-strain-measurement-accuracy-.html>
- [23] 5Pc BF350-3AA 350 ohm metal foil High-Precision Pressure Resistance Strain Gauge. *eBay* [online]. Aktualizováno 11. 11. 2020. [cit. 20. 12. 2020]. Dostupné z: <https://www.ebay.com/itm/5Pc-BF350-3AA-350-ohm-metal-foil-High-Precision-Pressure-Resistance-Strain-Gauge/293139260461?hash=item444076242d:g:OHsAAOSwug5dAh57>
- [24] Výroba tenzometrů a snímačů Zlín. *Lepení křemíkových odporových tenzometrů VTS Zlín a zapojování jejich vývodů do měřících řetězců* [online]. [cit. 20. 12. 2020]. Dostupné z: <https://vtsz.cz/image.ashx?i=157314.pdf&fn=>
- [25] Váhový senzor 50 Kg. *Drátek*. [online]. [cit. 4. 5. 2022]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/2202-vahovy-senzor-50-kg.html>

[26] INA240EVM User's Guide. *Texas Instruments* [online]. Aktualizováno: červenec 2017. [cit. 4. 5. 2022]. Dostupné z: [https://www.ti.com/lit/ug/sbou177a/sbou177a.pdf?ts=1650903603040&ref\\_url=https%253A%252F%252F](https://www.ti.com/lit/ug/sbou177a/sbou177a.pdf?ts=1650903603040&ref_url=https%253A%252F%252F)

[27] INA240 -4-V to 80-V, Bidirectional, Ultra-Precise Current Sense Amplifier With Enhanced PWM Rejection. *Texas Instruments* [online]. Aktualizováno: prosinec 2021. [cit. 4. 5. 2022]. Dostupné z: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina240.pdf?ts=1651650501138&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina240.pdf?ts=1651650501138&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)

[28] ESP32 WeMos LOLIN32 high resolution pinout and specs. *Mischianti* [online]. Aktualizováno: 1. prosince 2021. [cit. 4. 5. 2022]. Dostupné z: <https://www.mischianti.org/2021/02/21/esp32-wemos-lolin32-high-resolution-pinout-and-specs/>

[29] Bluetooth vs WiFi Comparison for the IoT Solutions. *netguru*. [online]. 29. ledna 2019. [cit. 4. 5. 2022]. Dostupné z: <https://www.netguru.com/blog/bluetooth-vs-wifi-comparison-for-the-iot-solutions>

[30] ESP32 Analog to Digital Conversion Accuracy. *w4krl*. [online] 2. června 2020. [cit. 4. 5. 2022]. Dostupné z: <https://w4krl.com/esp32-analog-to-digital-conversion-accuracy/>

[31] Data measured by the Assioma Power Meter Pedal. *Favero Electronics* [online] ©2015–2022. [cit. 8. 5. 2022]. Dostupné z: <https://cycling.favero.com/blog/tech-tests/data-measured-favero-assioma>