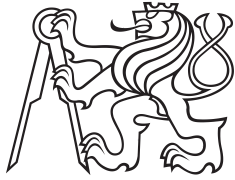


Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra Kybernetiky

Prototyp cyklistického wattmeru a sběr dat

Josef Macháč

Vedoucí: Ing. Jan Čech, Ph.D
Obor: Kybernetika a Robotika
Květen 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Macháč** Jméno: **Josef** Osobní číslo: **507633**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra kybernetiky**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Prototyp cyklistického wattmetru a sběr dat

Název bakalářské práce anglicky:

Prototype of cycling power meter and dataset collection

Pokyny pro vypracování:

1. Navrhněte a implementujte cyklistický wattmetr, který bude měřit krouticí moment pomocí tenzometrů na klikách. Otáčky budou měřeny například pomocí akcelerometru. 2. Otestujte prototyp a nasbírejte datovou sadu, která bude obsahovat záznamy jízd, tedy průběhy krouticího momentu, otáček, stavu zařazeného převodu, GPS dat (poloha, směr, rychlost), případně i průběhy fyziologických údajů jezdce (srdeční tep).

3. Datová sada bude obsahovat záznamy různých jízd a bude obsahovat anotace specifických situací, jako jsou např. zastavení, rozjezd, spurt ze sedla, skoky, pády atd.

Volitelné: Experimentujte s automatickou predikcí řazení a odhadem anotovaných situací. Datová sada bude rozdělena na disjunktní trénovací a testovací podmnožiny. Estimátor bude natrénován na trénovacích datech a kvantitativně vyhodnocen na testovací sadě.

Seznam doporučené literatury:

[1] Binsfeld Engineering Inc., What is a Strain Gage (Gauge) and How Does It Work?

<https://binsfeld.com/what-is-a-strain-gage-and-how-does-it-work/> [Online, 2.2.2024]

[2] Shimano. Shifting Technology – AutoShift.

<https://bike.shimano.com/en-EU/technologies/component/details/steps/auto-shift.html> [Online, 2.2.2024]

[3] Ian Goodfellow and Yoshua Bengio and Aaron Courville. Deep Learning, MIT Press, 2016.

[4] Zhuyang Xie, Yan Yang, Yiling Zhang, Jie Wang, Shengdong Du. Deep learning on multi-view sequential data: a survey, Artificial Intelligence Review, vol, 56, pp.6661–6704, 2023.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Čech, Ph.D. skupina vizuálního rozpoznávání FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **02.02.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

Ing. Jan Čech, Ph.D.

podpis vedoucí(ho) práce

prof. Dr. Ing. Jan Kybic

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

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu Ing. Janu Čechovi, Ph.D za jeho podporu, důvěru a zkušenosti, které mi velice pomohly při tvorbě této práce a řešení problémů s ní spojených. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu, které se mi během studií dostává. V kontextu této práce patří poděkování Ing. Josefu Macháčovi, mému otci, za pomoc s návrhem a tiskem úchyťových částí wattmetru na 3D tiskárně, materiální podporu nutnou pro konstrukci wattmetru a pomoc při testování. Děkuji také mé sestře Mgr. Vlastě Macháčové a mé matce Mgr. Vlastě Macháčové za jazykovou korekturu této práce. Dále děkuji Ing. Luboši Greplovi za konzultace ohledně návrhu DPS. Děkuji také Novus Bike s.r.o. za materiální podporu během této práce. Nakonec bych chtěl poděkovat svým kamarádům, především Lukáši Školoudíkovi, za pomoc s testováním wattmetru.

Prohlášení

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

V Praze, 24. května 2024

Abstrakt

Cílem této práce bylo navrhnout hardwarovou část cyklistického wattmetru, implementovat software wattmetru umožňující sběr dat ze senzorů, zpracování dat a následné odeslání zpracovaných dat přes protokol ANT+ a nezpracovaných dat přes WiFi-UART most s vyšší frekvencí odeslání, než tomu je u protokolu ANT+.

Následně byla ověřena funkčnost wattmetru a byly naměřeny datové sady, reprezentující různé specifické situace typické pro cyklistiku. V datových setech byla obsažena i data týkající se tepové frekvence jezdce, zařazeného převodu z elektronické přehazovačky a data GPS.

Wattmetr byl vyhodnocen z hlediska přesnosti měření točivého momentu a otáček a ukázalo se, že měřený točivý moment i kadence přibližně odpovídají očekávaným hodnotám.

Klíčová slova: cyklistický wattmetr, nRF52832, Nordic Semiconductor, ANT+, akcelerometr, měření otáček, ADC, WiFi, UART

Vedoucí: Ing. Jan Čech, Ph.D

Abstract

The aim of this work was to design the hardware part of a cycling power meter, implement the software for the power meter that allows data collection from sensors, data processing, and the subsequent transmission of processed data via the ANT+ protocol and unprocessed data via a WiFi-UART bridge at a higher transmission frequency than that of the ANT+ protocol.

Subsequently, the functionality of the power meter was verified and data sets representing various specific situations typical for cycling were measured. These data sets also included data on the rider's heart rate, the gear position from the electronic derailleur, and GPS data.

The power meter was evaluated in terms of the accuracy of torque and cadence measurements, and it was shown that the measured torque and cadence approximately correspond to the expected values.

Keywords: cycling power meter, nRF52832, Nordic Semiconductor, ANT+, accelerometer, RPM measurement, ADC, WiFi, UART,

Title translation: Prototype of cycling power meter and dataset collection

Obsah

1 Úvod	1	3 Softwarová implementace	19
1.1 Motivace	1	3.1 ANT+	20
1.2 Související práce	2	3.1.1 ANT+ BPWR profil	20
2 Použitý hardware	3	3.2 Vlastní implementace ANT+ BPWR profilu	20
2.1 Návrh plošného spoje	4	3.2.1 Rutina sběru a odeslání dat	21
2.2 Komponenty	10	3.2.2 ADC	22
2.2.1 nRF52832	10	3.2.3 Kalibrace	22
2.2.2 IAM-20381	11	3.2.4 Akcelerometr	23
2.2.3 ESP32	11	3.2.5 UART	24
2.2.4 ADS1220	11	3.3 WiFi-UART most	25
2.2.5 TPS82740A	11	3.3.1 Čtení dalších relevantních ANT+ dat	26
2.2.6 USB-C	12	4 Algoritmy zpracování dat	29
2.2.7 TPSM828214SILR	12	4.1 Výpočet kadence jezdce RPM	29
2.3 Měření analogového signálu	12	4.1.1 Měření kadence hledáním časového posunutí průběhů zrychlení os akcelerometru vůči sobě	30
2.3.1 Tenzometry pro měření smykového napětí kliky kola	12	4.1.2 Ostatní metody	34
2.3.2 TPS82740A jako reference	16		

4.2 Výpočet točivého momentu, výkonu a princip kalibrace	35
5 Experimenty a měření dat	37
5.1 Verifikace měření kadence	38
5.2 Verifikace měření točivého momentu	39
5.3 Sběr dat	40
5.3.1 Jízda ze sedla	41
5.3.2 Start	43
5.3.3 Normální jízda	43
5.3.4 Nástup	44
6 Nedostatky a budoucí práce	47
7 Závěr	49
A Literatura	51

Obrázky

2.1 Schéma DPS wattmetru	4	4.1 IIR filtrace	31
2.2 Horní vrstva DPS	5	4.2 Průběhy zrychlení na osách akcelerometru pro zvyšující se kadenci	32
2.3 Spodní vrstva DPS	5	4.3 Skalární součin os x, y časově posunutých signálů	33
2.4 Vnitřní napájecí vrstva	6	4.4 Kalibrace proložením naměřených bodů přímkou ve smyslu nejmenších čtverců.	36
2.5 Vnitřní zemnicí vrstva	6	5.1 Verifikace měření točivého momentu známým závažím	40
2.6 DSP - pohled na spodní část. Jde vidět vývod pro tenzometry a analogová část DPS	7	5.2 Vzájemná poloha průběhů točivého momentu a zrychlení na ose akcelerometru při jízdě v sedle	41
2.7 DPS - pohled na vrchní část	8	5.3 Vzájemná poloha průběhů točivého momentu a zrychlení na ose akcelerometru při jízdě ze sedla. Lze také sledovat narůst maximálního točivého momentu za snížení otáček při porovnání s jízdou v sedle	42
2.8 Osazená deska wattmetru nalepená na klice kola	9	5.4 Přejít na jízdu ze sedla a zpět. Kolem 25 s jde vidět zařazení těžšího převodu - začíná jízda ze sedla. Kolem 85 s jde vidět přeřazení na lehčí převod - jízda ze sedla končí a jezdec dále jede v sedě.	42
2.9 Osazená deska wattmetru nalepená na klice, pohled z profilu	10	5.5 Start	43
2.10 Tenzometr v aplikaci pro měření smykového napětí na hřídeli [3] . . .	13	5.6 Normální jízda	44
2.11 Tenzometr nalepený na klice Sram NX Eagle	14	5.7 Nástup	45
2.12 Schéma zapojení analogové části obvodu [20]	15		
2.13 Časový záznam napětí na výstupu měniče. Jeden dílek osy x má 20 μs a jeden dílek osy y má 20 mV	17		

Tabulky

2.1 Hodnoty komponent analogového filtru	15
3.1 Formát UART paketu. B0 - B5 jsou jednotlivé datové byty. Watermark je využitý pro rozeznání typu paketu	24
3.2 Formát UART paketu pro data z AD převodníku. $B_{0,[0-2]}$ jsou tři byty prvního vzorku a $B_{1,[0-2]}$ jsou tři byty druhého vzorku.	25
3.3 Formát UART paketu pro data z akcelerometru	25
5.1 Verifikace algoritmu počítajícího kadenci	38
5.2 Průměrná absolutní chyba, střední kvadratická chyba, průměrná chyba a rozptyl. ME a MAE jsou stejné, což ukazuje na možnost chybu potlačit zjištěním offsetu pro konkrétní intervaly měření	38
5.3 Verifikace výpočtu výkonu nepřímo ověřením vztahu výstupu ADC a aplikovaného točivého momentu na osu klik.	39
5.4 Průměrná absolutní chyba, střední kvadratická chyba, průměrná chyba a rozptyl. ME a MAE jsou stejné, což ukazuje na možnost chybu potlačit zjištěním offsetu pro konkrétní intervaly měření	39

Kapitola 1

Úvod

Cyklistika nabízí mnoho zajímavých aplikací pro uplatnění machine learningu. Jedna z aplikací, jejíž dílčí část tato práce řeší, je částečná eliminace lidského faktoru v procesu řazení. Částečná eliminace lidského faktoru v procesu řazení na jízdním kole umožní zvýšit bezpečnost a pohodlí uživatele, prodloužit životnost mechanických komponent kola nebo co nejefektivnější přenos výkonu během závodních i tréninkových situací.

1.1 Motivace

Motivace stojící za touto prací je konstrukce a softwarová implementace cyklistického wattmetru, který bude schopen poskytovat data potřebná pro budoucí učení prediktoru řazení. Tento prediktor pak bude schopen jezdce nahradit v řazení. Tím zvýší komfort, bezpečnost a efektivitu přenosu výkonu jezdce.

Na trhu je již nějakou dobu široká nabídka cyklistických wattmetrů, které poskytují výstup v podobě dat o výkonu, kadenci a veličin, týkajících se dynamiky jízdy jezdce. Tato data jsou odesílána přes protokol ANT+ do zobrazovacího zařízení.

V této práci je popsán wattmetr, který také disponuje standardním ANT+ výstupem, ale navíc přidává možnost odesílání nezpracovaných dat přes WiFi-

UART most s vyšší odesílací frekvencí, než se kterou odesílá zpracovaná data protokol ANT+. Dále je možné upravovat software wattmetru, což umožňuje reagovat na vývojářské požadavky.

1.2 Související práce

V minulosti již vznikly práce s cílem zhotovit cyklistický wattmer, žádné se ale nevěnovaly získání příslušných nezpracovaných dat ze senzorů s motivací následného využití těchto dat pro naučení prediktoru řazení.

Z prací, které byly dohledány bych chtěl zmínit řešení [7], které je této práci nejbližší z hlediska použitých hardwarových komponent. V práci je využitý modul SG53, což je již hotový modul wattmetru, implementující ANT+ protokol. K tomuto modulu stačí jen připojit tenzometry, zkalibrovat a wattmetr je plně funkční.

Práce [16] se věnuje konstrukci cyklistického wattmetru se sériovým Bluetooth terminálem. Snímání působící síly je realizováno váhovým senzorem na pedálu, umožňujícím snímat pouze sílu působící shora, a snímání otáčení kliky je realizováno magnetickým spínačem, který při otáčení spíná externí magnet.

Tento článek [8] popisuje, jak lze cyklistický wattmetr sestavit za použití konkrétních komponentů, kde jádrem řešení je znovu měření deformace kliky pomocí tenzometrů a měření úhlové rychlosti pomocí gyroskopu.

Kapitola 2

Použitý hardware

Tato kapitola se bude věnovat návrhu a konstrukci desky plošného spoje (DPS) a použitým hardwarovým komponentům. Budou zde popsány jednotlivé vrstvy DPS z pohledu jejich funkce, a budou také popsány použité komponenty z pohledu jejich funkce a možností.

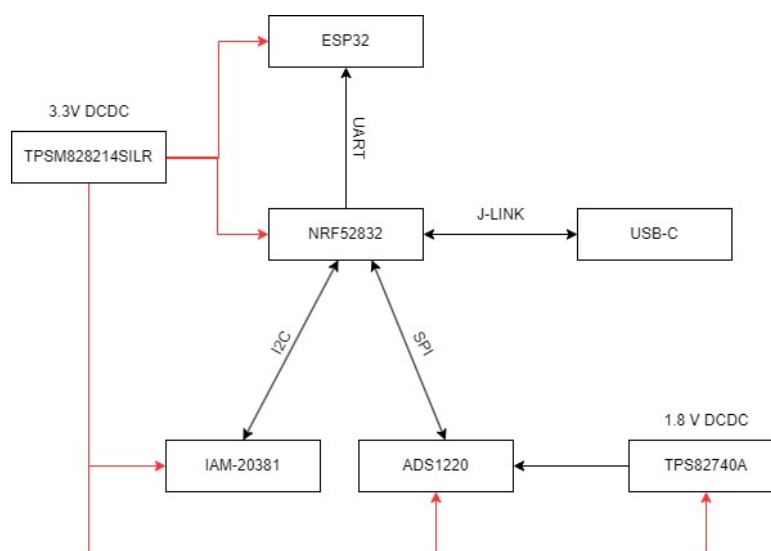
V dnešní době je dostupnost návrhu a následné výroby vlastní DPS skvělá, především kvůli celosvětové infrastruktuře umožňující plošné spoje vyrábět v zahraničí, kde se vyrábějí ve velkém množství a jsou tak levné. Proces výroby DPS začíná rozmyšlením komponentů, které se použijí, kde mezi hlavní rozhodující faktory patří cena, dostupnost a rozhraní komponentu, které podporuje použitý procesor. Typická rozhraní jsou I2C, SPI nebo UART. Pro návrh DPS slouží mnoho komerčních softwarů, například EAGLE Autodesk, kde se vytvoří schéma a z něj pak DPS. Následně se DPS exportuje do formátu, který firma zhotovující DPS požaduje.

Velké firmy zaměřené na výrobu DPS běžně nabízejí i osazení DPS, pro kusovou výrobu je ale osazení z pravidla relativně drahé, proto je většinou lepší zařídit si kusové napájení, například u firem specializujících se na opravy počítačů a mikroelektroniky.

Plošné spoje lze vyrábět i doma, ale u vícevrstevných desek se složitějšími komponenty už je potřeba profesionální vybavení. V porovnání s rychlostí a cenou, se kterou výrobu DPS nabízejí zahraniční firmy, se navíc domácí výroba nevyplatí.

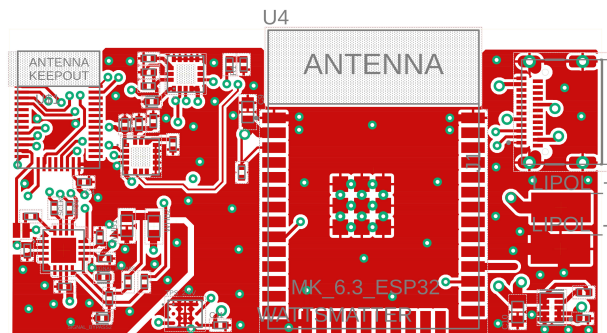
2.1 Návrh plošného spoje

Schéma 2.1 ukazuje vztahy a provázanost komponentů DPS. Černé jednostranné šipky představují komunikaci přes rozhraní pouze jedním směrem, oboustranné černé šipky představují obousměrnou komunikaci přes rozhraní a červené šipky představují jednotlivé typy napájení DPS. Hlavním výpočetním centrem implementace je nRF52832. Komponenty DPS budou podrobně popsány v sekci 2.2.



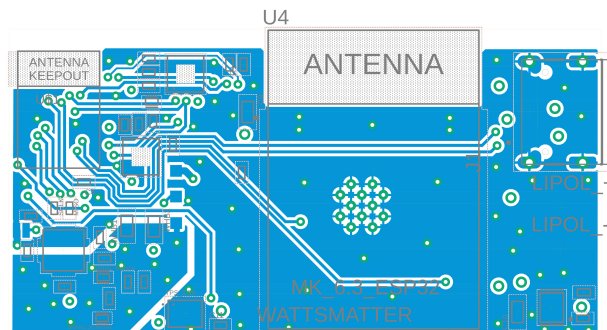
Obrázek 2.1: Schéma DPS wattmetru

Plošný spoj wattmetru byl navržen v EAGLE Autocad a jeho blokové schéma je na obrázku 2.1, kde lze vidět typy rozhraní, použitých pro komunikaci mezi komponenty. Deska byla vyrobená firmou ALLPCB a má čtyři vrstvy, kde každá z vrstev má specifickou funkci.



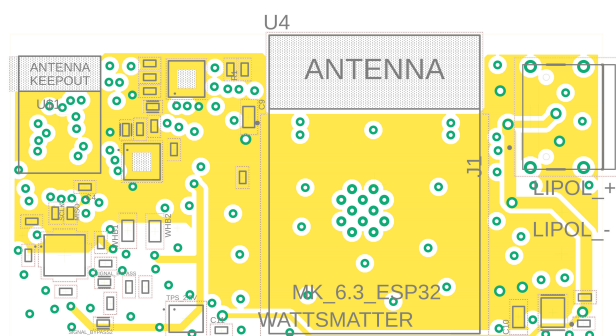
Obrázek 2.2: Horní vrstva DPS

Obrázek 2.2 zobrazuje vrchní signálovou vrstvu, na které jsou umístěné veškeré komponenty DPS. Tato vrstva tedy slouží k uchycení komponent a k jejich spojení, pomocí signálových cest.



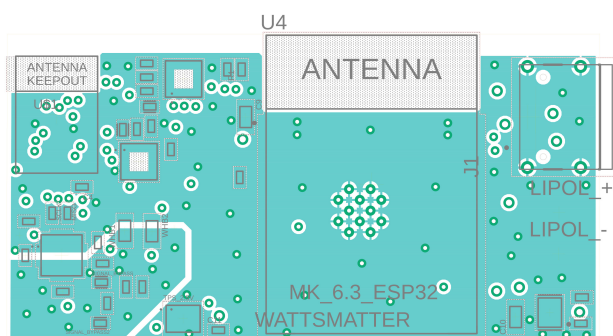
Obrázek 2.3: Spodní vrstva DPS

Obrázek 2.3 zobrazuje spodní signálovou vrstvu, která pomáhá vrchní vrstvě v propojení komponentů signálovými cestami. Na spodní vrstvě se nachází pouze vývod pro připojení tenzometru, jinak spodní vrstva neobsahuje žádné komponenty.



Obrázek 2.4: Vnitřní napájecí vrstva

Obrázek 2.4 zobrazuje vnitřní vrstvu DPS, sloužící k napájení celé DPS. Lze vidět rozdělení vstvy na více částí. Rozlitaná měď představuje 3.3 V, dále lze vidět část napájení z Li-pol baterie a napětí z měniče pro analogovou část DPS. Rozlitaná měď se nenachází v analogové části DPS pro minimalizaci šumu v analogovém signálu.

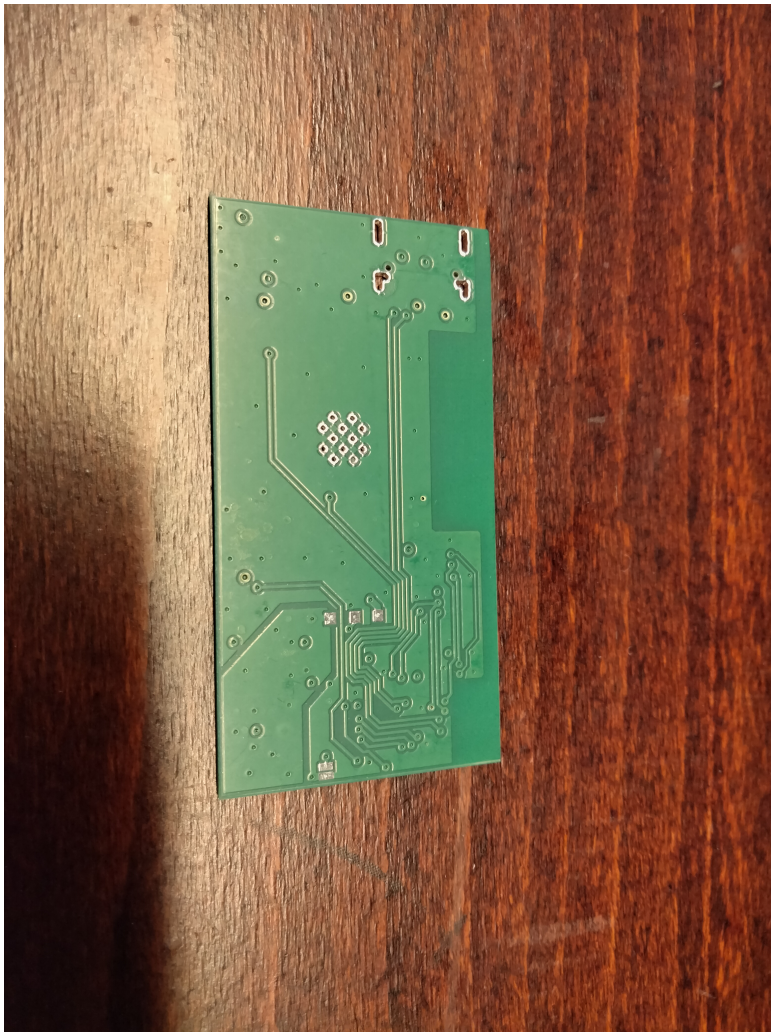


Obrázek 2.5: Vnitřní zemnicí vrstva

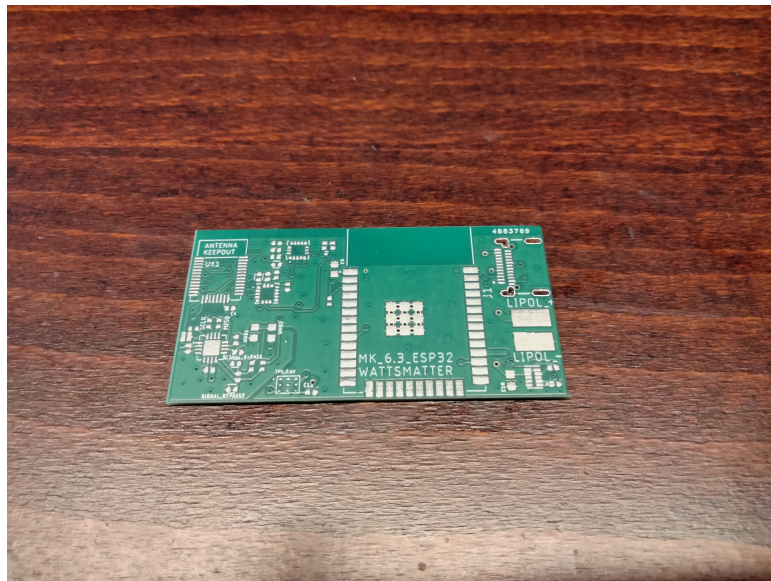
Obrázek 2.5 zobrazuje hlavní zemnicí vrstvu DPS. Na tuto vrstvu se zemní i rozlitaná měď vrchní a spodní vrstvy DPS. Na DPS je oddělená analogová

a digitální zem, kvůli minimalizaci šumu v analogovém signálu. Rozlitá měď vrchní i spodní vrstvy, představující zemění, je také rozdělena na digitální a analogovou část. Tyto části jsou spojené s příslušnou částí hlavní zemnicí vrstvy DPS. Analogová a digitální zem jsou spojeny pomocí nulového rezistoru v bezprostřední blízkosti ADC na vrchní vrstvě DPS.

Vrchní vrstva je signálová a jsou na ní umístěné veškeré komponenty. Spodní vrstva je také signálová, ale komponenty neobsahuje z důvodu příjemnějšího osazování desky. Z vnitřních vrstev to jsou zemnicí vrstva a vrstva realizující napájení. Zemnicí vrstva se dělí na dvě. Analogovou a digitální. Napájecí vrstva je rozdělená na tři části. Napájení z Li-pol baterie, 3.3 V napájení všech hardwarových komponent a oddělené napájení 1.8 V pro analogovou část DPS.



Obrázek 2.6: DSP - pohled na spodní část. Jde vidět vývod pro tenzometry a analogová část DPS



Obrázek 2.7: DPS - pohled na vrchní část



Obrázek 2.8: Osazená deska wattmetru nalepená na klíče kola



Obrázek 2.9: Osazená deska wattmetru nalepená na klice, pohled z profilu

■ 2.2 Komponenty

■ 2.2.1 nRF52832

nRF52832 je procesor od firmy Nordic Semiconductor. Zvolil jsem jej kvůli podpoře protokolu ANT+, jeho nízké spotřebě, relativně vysokému výkonu a také kvůli optimalizaci procesoru pro použití ve vestavných systémech.

Na DPS byl procesor použitý v rámci modulu, který řeší správné umístění

antény a obsahuje všechny potřebné komponenty vyžadované procesorem.

■ 2.2.2 IAM-20381

IAM-20381 je digitální tříosý akcelerometr, disponující 512 bytovým FIFO zásobníkem, rozhraním I2C a SPI. Pro komunikaci s procesorem je využito rozhraní I2C. V této práci je použit pro snímání zrychlení na osách x a y. Akcelerometr také disponuje chytrými funkcemi, jako je Wake-on-motion, které bude v budoucnu použité na probuzení wattmetru z režimu spánku.

■ 2.2.3 ESP32

ESP32 je výkonný procesor disponující technologií WiFi a Bluetooth. Na desce wattmetru je využitý pro vysokorychlostní přenos dat na další zařízení. nRF52832 poskytuje veškerá data ESP32 přes UART rozhraní, a ESP32 pak tato data přes WiFi zrcadlí zařízením připojeným na přístupový bod, který samo poskytuje.

■ 2.2.4 ADS1220

ADS1220 je 24 bitový AD převodník, použitý na vzorkování signálu z Wheatstoneova můstku. Pro komunikaci s nRF52832 se využívá rozhraní SPI. AD převodník disponuje také teplotním senzorem a možností použít napájecí napětí Wheatstoneova můstku jako referenci pro měření.

■ 2.2.5 TPS82740A

Pro napájení Wheatstoneova můstku je použitý měnič TPS82740A, a to kvůli oddělení digitálního a analogového napájecího napětí za účelem čistějšího referenčního napětí můstku. Výstupní napětí TPS82740A je nastaveno na 1.8 V. TPS82740A bylo použité z důvodu jeho velmi nízké vlastní spotřeby.

■ 2.2.6 USB-C

USB-C umožňuje pohodlné nahrávání softwaru, ladění a napájení desky. Pro nahrávání softwaru do wattmetru je využito nRF52 DK využívající rozhraní J-link.

■ 2.2.7 TPSM828214SILR

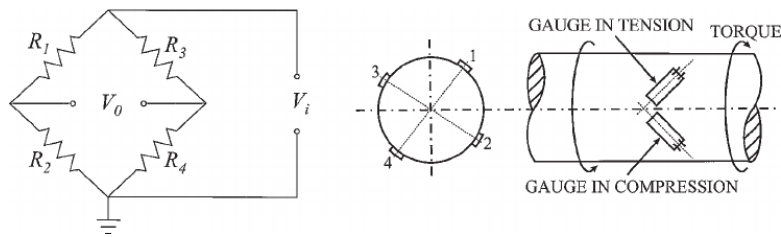
Pro digitální napájení desky je použitý měnič TPSM828214SILR s pevným výstupním napětím 3.3 V. Tento měnič byl použit kvůli své velmi nízké spotřebě v porovnání s lineárním regulátorem.

■ 2.3 Měření analogového signálu

Pro měření mechanického namáhání kliky kola byl použitý fóliový tenzometr. Měření přesného analogového signálu z tenzometrů na DPS s RF komponenty a digitálními rozhraními vyžaduje jistá přizpůsobení, aby měřený analogový signál byl co nejčistší a obsahoval co nejméně nežádoucího šumu. Tato přizpůsobení byla po částech popsána výše. Konkrétně se jedná zejména o oddělení jak napájení, tak zeměni analogové a digitální části DPS. Dále byly použity stíněné kabely pro připojení tenzometru na DPS a tenzometr byl překryt pryskyřicí pro izolaci před vlhkostí a hliníkovou fólií pro stínění. Analogová část DPS byla navržena s ohledem na doporučení z dokumentace ADS1220.

■ 2.3.1 Tenzometry pro měření smykového napětí kliky kola

Je více možností, kam umístit tenzometry pro měření výkonu na jízdním kole. Tomuto tématu se z části věnuje práce [9]. V této práci bylo použito řešení měření smykového napětí na klice pomocí půlmostového fóliového tenzometru 1-XY43-3/350 [6] od firmy HBM s nominálním odporem 350Ω. Obrázek 2.10 ukazuje princip použitého řešení.



Obrázek 2.10: Tenzometr v aplikaci pro měření smykového napětí na hřídeli [3]

Na obrázku 2.10 je vidět Wheatstoneův můstek se čtyřmi rezistory. V této práci jsou proměnné pouze dva rezistory můstku, R_3 a R_4 . R_1 a R_2 mají fixní hodnotu.

Půlmostové řešení představuje kompromis mezi cenou tenzometru a kvalitou měření mechanického namáhání kliky. Půlmostové zapojení tenzometrů v můstku je takové zapojení, kde jednu z větví můstku tvoří tenzometry a druhou větev tvoří rezistory s pevnou hodnotou. Mezi výhody půlmostového zapojení patří lepší teplotní kompenzace a větší přesnost měření kvůli skutečnosti, že při mechanickém namáhání hřídele, potažmo kliky kola, se jeden tenzometr roztahuje a druhý smršťuje, což způsobí větší změnu rozdílového napětí na Wheatstoneově můstku, než je tomu u nejjednoduššího, čtvrtmostového zapojení, kde je pouze jeden tenzometr. Při instalaci tenzometrů je třeba dbát na to, aby jeden tenzometr svíral 45° a druhý -45° s pomyslnou úsečkou, spojující v případě kliky kola osu pedálu a osu kliky, procházející rámem kola. Použitá tenzometrická fólie obsahuje dva tenzometry, které spolu svírají úhel 90° .



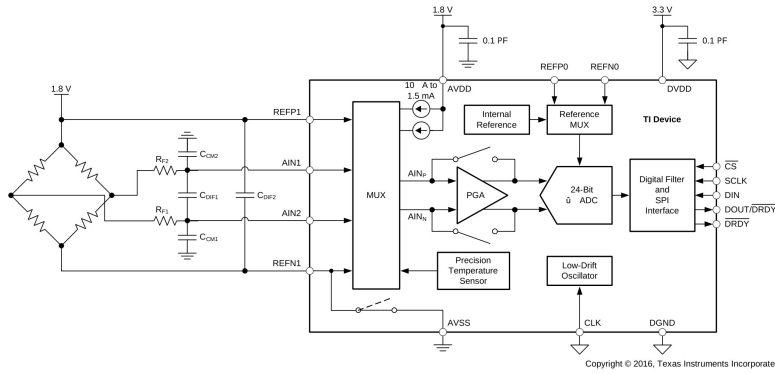
Obrázek 2.11: Tenzometr nalepený na klice Sram NX Eagle

Při využití Wheatstoneova můstku pro měření změny odporu některého z rezistorů v můstku platí, že vztah mezi výstupním napětím na můstku a změnou odporu ΔR můžeme považovat za lineární, pokud platí, že

$$\Delta R \ll R_0, \quad (2.1)$$

kde R_0 je odpor mechanicky nezatíženého tenzometru [17].

Na schématu 2.12 je vidět zapojení můstku s tenzometry do AD převodníku. Napájení můstku je realizováno pomocí výše zmíněného TPS82740A. Toto napájení je zároveň použito i jako napěťová reference AD převodníku. Dle doporučeného zapojení AD převodníku byl použitý jednoduchý analogový filtr, skládající se z rezistorů a kondenzátorů. Hodnoty komponent jsou uvedeny v tabulce 2.1



Obrázek 2.12: Schéma zapojení analogové části obvodu [20]

R_{f2}	R_{f1}	C_{CM2}	C_{DIF1}	C_{CM1}
2.4 K Ω	2.4 K Ω	3 μ F	3 μ F	1.5 μ F

Tabulka 2.1: Hodnoty komponent analogového filtru

Hodnoty komponent analogového filtru byly spočítány dle následujících vztahů

$$f_{CM} = \frac{1}{2\pi R_{f2} C_{CM2}} [10] \quad (2.2)$$

$$f_{DIF} = \frac{1}{2\pi 2R_{f2} (C_{DIF1} + \frac{1}{2}C_{CM2})} [10], \quad (2.3)$$

kde f_{CM} je mezní frekvence filtru rozdílového napětí na můstku a f_{DIF} je mezní frekvence pro filtr souhlasného napětí.

Po dosazení dostaneme následující hodnoty mezních frekvencí filtrů

$$f_{CM} = 22.1 \text{ Hz} \quad (2.4)$$

$$f_{DIF} = 7.37 \text{ Hz} \quad (2.5)$$

Důležitou vlastností aplikací, měřících velice jemný signál, je rozlišení měření, kde nás zajímá, jak malou změnu napětí jsme schopni rozlišit. Jelikož je použitý AD převodník 24 bitový a napájení můstku, a zároveň i reference AD převodníku je 1.8 V, můžeme spočítat, jakou hodnotu napětí představuje nejméně významný bit dle vztahu

$$LSB = \frac{V_{ref}}{2^N}, \quad (2.6)$$

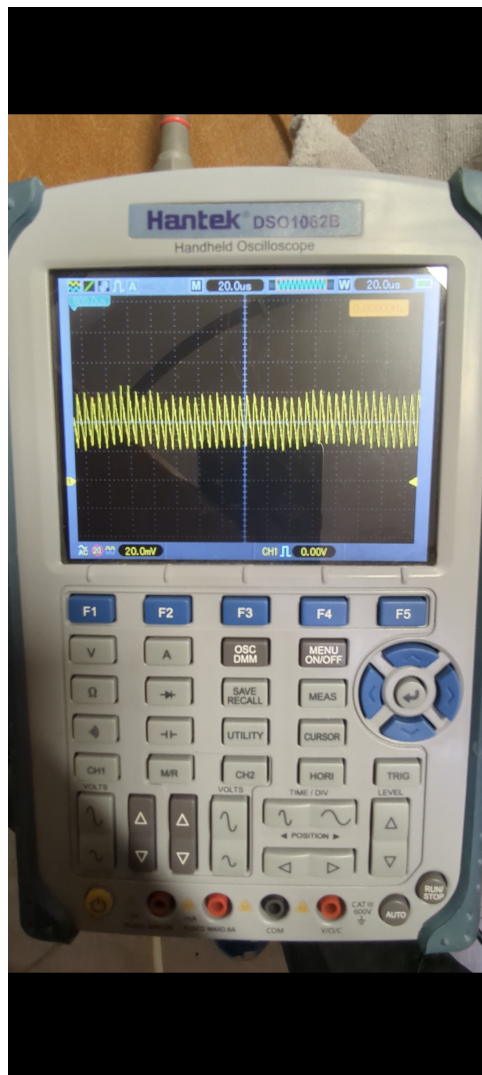
kde V_{ref} je napájecí napětí můstku a reference AD převodníku. N je efektivní rozlišení AD převodníku, což je v případě ADS1220 20 bitů. Po dosazení dostáváme rozlišení

$$LSB = \frac{1.8}{2^{20}} \approx 1.72 \mu V \quad (2.7)$$

Hodnota síly působící na pedál se liší podle hmotnosti jezdce. Pro případ této práce se jedná o přibližný rozsah 0 - 1500 N. V této práci LSB odpovídá změně o $\approx 0.012 N$. Maximální změna napětí na můstku činí tedy pro výše zmíněný rozsah 0.215 V.

■ 2.3.2 TPS82740A jako reference

Jako napájení můstku a reference AD převodníku byl použitý měnič TPS82740A. Tohle řešení se ukázalo jako nevhodné, protože napětí na výstupu měniče osciluje kvůli samotnému principu měniče. Tento jev 2.13 byl pozorován na osciloskopu, jehož sonda byla připojena na výstup měniče. Z časového záznamu lze vyčíst, že frekvence oscilace se pohybuje kolem 0.2 MHz, a že amplituda oscilací je $\pm 20 mV$.



Obrázek 2.13: Časový záznam napětí na výstupu měniče. Jeden dílek osy x má 20 us a jeden dílek osy y má 20 mV

Na DPS byly přidány i dva keramické kapacitry s hodnotami 0.1 μF a 0.01 μF blízko výstupu měniče, oscilace se ale i přesto nepodařilo potlačit.

Kapitola 3

Softwarová implementace

V této kapitole bude podrobně popsána softwarová implementace wattmetru. Bude vysvětleno, jak se čtou data ze senzorů, jak se odesílají a jak se efektivně využívá jednojádrový procesor v časově kritické aplikaci, jakou je právě tato softwarová implementace.

Při návrhu vestavěného systému je potřeba vzít v úvahu mnoho faktorů. Jedním z hlavních je výběr řídicího procesoru, který bude mozkiem celé aplikace. Při tomto výběru je vhodné zvážit celou řadu faktorů, z kterých pár nejdůležitějších zmíním. Za nejdůležitější faktor pro výběr řídicího procesoru považuji množství a kvalitu dokumentace, společně s ovladači periferií procesoru, nejlépe dodávaných, případně podporovaných výrobcem. Pokud jsou tyto věci k dispozici, výrazně to ušetří vývojářům čas strávený vývojem softwaru pro vestavěnou aplikaci.

Jako druhý faktor bych zmínil typ vývojového prostředí a rozhraní pro ladění aplikace, společně s programovacím jazykem, který vývojové prostředí podporuje. Jelikož aplikace, potažmo program, není spouštěna přímo na počítači použitém pro programování procesoru, je nutné zvážit, jakým způsobem chce vývojář aplikaci ladit. Pro ladění lze použít externí debugger, který umožňuje pokročilejší ladění i s možností náhledu do paměti laděného procesoru. Pokud procesor žádné z pokročilých ladících rozhraní nepodporuje, je možné využít například rozhraní UART, přes které lze posílat ladící data z procesoru. V tomto řešení už ale musí vývojář přesně definovat, jaká data chce přes UART do počítače posílat.

3.1 ANT+

ANT+ [2] je bezdrátový komunikační protokol pro aplikace s velmi nízkou spotřebou energie využívající vysílací, potažmo přijímací frekvenci 2457 MHz, vyvinutý společností Dynastream Innovations. ANT+ je postavený na protokolu ANT, který rozšiřuje o profily zařízení, které zajišťují kompatibilitu všech ANT+ zařízení implementujících stejný profil zařízení. Například pokud máme jakýkoliv senzor srdečního tepu implementující ANT+ profil senzoru srdečního tepu a jakékoliv zobrazovací zařízení implementující tento stejný profil, budou spolu zařízení bez problému spolupracovat. Síť tvořená ANT+ zařízeními spadá do kategorie osobních sítí PAN, kde jednotlivé sítě jsou oddělené vzdáleností, kterou mezi sebou mají.

Protokol ANT+ je hojně využíván napříč všemi sportovními odvětvími díky své spolehlivosti, robustnosti a hlavně díky nízké spotřebě energie. ANT+ zařízení vydrží fungovat zpravidla jednotky let na jednu knoflíkovou baterii.

3.1.1 ANT+ BPWR profil

BPWR (bicycle power) ANT+ profil zařízení a dokumentace k němu je majetkem Dynastream Innovations, tudíž není možné jej zde popsat do detailu. Dokumentace k tomuto profilu je přístupná po registraci na této stránce, nicméně pro tuhle práci není podstatné, jak přesně profil funguje.

3.2 Vlastní implementace ANT+ BPWR profilu

Pro vlastní implementaci BPWR profilu byl využitý již zmíněný procesor nRF52832, ke kterému je možné si stáhnout nRF SDK [14], což je soubor knihoven a ovladačů od firmy Nordic Semiconductor pro vývoj vlastního softwaru pro všechny řady procesorů této firmy. Procesor nRF52832 jsem zvolil i kvůli softwarové podpoře ANT+ protokolu. Nordic Semiconductor ve spolupráci s Dynastream Innovations umožňuje používat ANT a ANT+ protokol na vybraných procesorech, tak, že nRF SDK integruje speciální software - Softdevice - vyvinutý firmou Dynastream Innovations, který je spuštěn nad aplikací uživatele a využívá nRF52832 pro bezdrátovou komunikaci přes protokol ANT+.

Ovladače a knihovny nRF SDK jsou napsané v jazyce C.

■ 3.2.1 Rutina sběru a odeslání dat

ANT+ BPWR profil je implementovaný pomocí Softdevice tak, že vysílá s určitou frekvencí různé datové pakety ve velikosti desítek bajtů. Typů paketů BPWR profilu je několik. S nejvyšší četností se odesílá paket obsahující data týkající se výkonu cyklisty. S nižší četností to jsou data společná pro většinu ANT+ profilů zařízení, jako je třeba stav baterie nebo údaje o výrobci. Pro BPWR profil je typický i kalibrační paket 3.2.3, což je paket, po jehož přijetí musí následovat kalibrace offsetu tenzometru.

Jelikož má procesor jen jedno jádro, je nutné řešit, jak bude řízen přístup procesů a rutin k procesorovému času. U nRF52832 s použitým Softdevice je přístup k procesoru řízen pomocí sedmi priorit, kde uživatel má k dispozici pro svoji aplikaci pouze tři nejnižší. Zbytek priorit je vyhrazených pro Softdevice, kvůli spolehlivému a přesnému časování RF provozu.

Úseky mezi jednotlivými vysílacími okny jsou relativně dlouhé a umožňují procesoru šetřit baterii tak, že se uspí a čeká na přerušení. Jelikož požadavek na předání naměřených dat paketu, který má být odeslán, je neprodleně následován odesláním tohoto paketu, není možné provádět časově náročné operace při obdržení požadavku na naplnění paketu, jako je čtení zásobníku senzoru nebo provádění náročných matematických operací. Tato skutečnost byla vyřešena použitím časovače, který se spouští při každém obdržení požadavku na naplnění paketu a je nastaven na takový čas, aby se chvíli po té, co se odešle paket pomocí ANT+, zavolala obsluha přerušení časovače, ve které se přečtou a vyhodnotí data ze senzorů. Dá se tedy říct, že data, která jsou odesílána, jsou zpožděna o $\frac{1}{f_s}$, kde f_s je frekvence odesílání paketu, 4 Hz. Pro aplikaci cyklistického wattmetru je toho zpoždění s ohledem na frekvenci odesílání zanedbatelné.

Při práci s jednotlivými rozhraními nRF52832 je nutné také brát ohled na to, jaká rozhraní a kolik jejich instancí se používá v daný moment. Je to kvůli tomu, že rozhraní jsou v procesoru realizovaná hardwarově, a kvůli omezeným zdrojům některá rozhraní sdílí stejný registr v procesoru, tudíž je nelze využít zároveň.

■ 3.2.2 ADC

Pro komunikaci s ADS1220 se využívá rozhraní SPI. Ovladač pro SPI periferie je součástí nRF SDK. Klasické rozhraní SPI podporuje řízení přístupu k médiu pomocí speciálního pinu CS (Chip select), kterým si řídicí procesor vybírá, s kterým zařízením na společné sběrnici chce komunikovat. V mém případě je na sběrnici pouze jedno zařízení, tudíž je na jeho CS pinu permanentně logická 0, která zajišťuje, že AD převodník je připraven na komunikaci s procesorem neustále. Rychlost rozhraní SPI je nastavená na 1 Mb/s.

Při zapnutí wattmetru proběhně inicializace rozhraní SPI a ADS1220 se nakonfiguruje na kontinuální měření se vzorkovací frekvencí 330 Hz. Zvolí se externí reference a nastaví se zesílení integrovaného zesilovače AD převodníku na 128×.

Sběr dat je řízen pomocí DRDY (Data ready) pinu AD převodníku, který po každém novém vzorku generuje náběžnou hranu. Na straně procesoru tato náběžná hrana vygeneruje přerušení, a procesor nový vzorek zapíše do zásobníku pro pozdější vyhodnocení. Hned po tom se uspí. Zde je využitý dvojitý buffering kvůli scénáři, kdy se zrovna zpracovávají data z AD převodníku, a zároveň se musí obsloužit přerušení, vygenerované DRDY pinem. Zásobníky jsou tedy dva, jeden pro zápis a druhý pro čtení, a střídají se vždy po odeslání paketu přehozením ukazatele.

■ 3.2.3 Kalibrace

Po obdržení kalibračního paketu se od wattmetru očekává reakce v podobě zkalibrování offsetu tenzometrů - vynulování. Na přijetí kalibračního požadavku tedy wattmetr reaguje zápisem průměrné hodnoty výstupu AD převodníku do perzistentní paměti FLASH a zároveň i do paměti RAM, kde tato hodnota slouží jako offset výstupu AD převodníku. FLASH paměť se přečte vždy po zapnutí wattmetru a hodnota offsetu se nahraje do paměti RAM. Zápis do paměti FLASH je kritický proces, a tudíž bylo nutno jej implementovat tak, aby proces zápisu a čtení nic nepřerušilo. Pro tuto implementaci byl využit ovladač pro práci s perzistentní pamětí procesoru z nRF SDK.

3.2.4 Akcelerometr

Pro komunikaci s IAM-20831 je využito rozhraní TWI. Ovladač pro TWI periferie je součástí nRF SDK. Rozhraní TWI používá adresaci zařízení na sběrnici pro řízení přístupu k médiu. Adresa zařízení se posílá vždy na začátku komunikace v 8 bitovém paketu, kde adresa zařízení zabírá 7 bitů. To znamená, že na jedné sběrnici může být až 128 zařízení. 8. bit prvního paketu signalizuje, zda se jedná o čtení, či zápis. V případě této práce je na sběrnici pouze jedno zařízení.

Sběrnice TWI vyžaduje pull-up rezistory jak na datovém, tak na hodinovém vodiči. nRF52832 obsahuje interní pull-up i pull-down rezistory, které lze ovládat softwarově, a toto řešení bylo také využito. Externí pull-up rezistory se tudíž na DPS nenacházejí. Rychlost TWI je nastavená na 100 Kbit/s.

Ovladač TWI podporuje dva módy. Bez přímého přístupu do paměti, kde zápis odesílaných, nebo přijímaných dat provádí procesor, nebo s přímým přístupem do paměti, kdy se procesor o zápis a čtení dat nemusí starat, a pouze zápis či čtení spustí. V této práci je použitý ovladač s přímým přístupem do paměti - DMA (direct memory access). Toto řešení umožňuje šetřit procesorovým časem a umožňuje procesoru věnovat se jiným procesům, jelikož čtení či zápis s rychlostí 100 Kbit/s jsou relativně pomalé a berou hodně procesorového času.

Při spuštění wattmetru proběhne inicializace rozhraní TWI a provede se základní nastavení IAM-20831, které povolí zápis dat do FIFO zásobníku s vzorkovací frekvencí 100 Hz.

FIFO zásobník umožňuje snížit vytíženost sběrnice. Čtení dat z FIFO zásobníku probíhá v obsluze přerušování časovače, která se spouští, jak již bylo zmíněno, krátce po odeslání paketu protokolu ANT+. Procesor zjistí počet nepřčtených bytů ve FIFO zásobníku a spustí čtení přes TWI s využitím DMA. Jelikož interní DMA modul nRF52832 je limitovaný na 255 bytové transakce, stará se tato implementace i o rozdělení větších transakcí na více malých, které následně postupně procesor spouští. Takto přečtená data jsou zapsána do zásobníku pro pozdější vyhodnocení.

3.2.5 UART

Implementace rozhraní UART mezi nRF52832 a ESP32 je velice důležitá a významná pro tuto práci. Následující části popíší, jak se z wattmetru dostávají měřená nezpracovaná data, která jsou důležitá pro budoucí učení prediktoru řazení.

UART slouží k asynchronnímu sériovému přenosu dat mezi nRF52832 a ESP32. Jelikož je komunikace mezi těmito dvěma procesory pouze jednosměrná, je na NRF52832 využitý pouze TX pin a na ESP32 pouze RX pin a TX pin ESP32 je ponechán volně, nezakončený. Hardwarová kontrola toku dat není využita a kontrola integrity přenosu je realizovaná kontrolním součtem CRC. Rychlost UART je nastavená na nejvyšší možnou hodnotu, podporovanou nRF52832, 115200 baud/s.

Ovladač rozhraní UART je dostupný v nRF SDK a také podporuje, stejně jako všechna rozhraní nRF52832, přímý přístup do paměti. Přímý přístup do paměti má zde také velké opodstatnění, kvůli nutnosti opakovaně přenášet relativně velké množství dat s co nejmenším časovým vytížením procesoru.

V obsluze přerušení časovače UART rutina zpracovává a odesílá data z AD převodníku i akcelerometru. Formát obecného paketu, posílaného přes UART, je znázorněn v tabulce 3.1, kde každé pole tabulky reprezentuje jeden byte. První byte je využitý pro rozlišení toho, o jaký paket se jedná, zda o paket s daty AD převodníku, nebo paket s daty akcelerometru. Dalších 6 bytů jsou data senzoru a poslední dva byty jsou kontrolní součet CRC. Tyto pakety se tvoří a vkládají do UART TX zásobníku v obsluze přerušení časovače po přečtení všech nových dat ze senzorů. TX zásobník je následně rozdělen na části s maximální délkou 255 bytů, a pomocí DMA jsou jednotlivé části TX zásobníku odeslány do ESP32.

watermark	B0	B1	B2	B3	B4	B5	CRC0	CRC1
-----------	----	----	----	----	----	----	------	------

Tabulka 3.1: Formát UART paketu. B0 - B5 jsou jednotlivé datové byty. Watermark je využitý pro rozeznání typu paketu

Formát UART paketu s daty z AD převodníku je znázorněn v tabulce 3.2. ADS1220 je 24 bitový AD převodník, tudíž jeho jeden vzorek zabírá 3 byty. Pro vyšší přenosovou rychlost jsou v jednom UART paketu posílány 2 vzorky AD převodníku najednou, tudíž 6 datových bytů.

1	B_{00}	B_{01}	B_{02}	B_{10}	B_{11}	B_{12}	CRC0	CRC1
---	----------	----------	----------	----------	----------	----------	------	------

Tabulka 3.2: Formát UART paketu pro data z AD převodníku. $B_{0,[0-2]}$ jsou tři byty prvního vzorku a $B_{1,[0-2]}$ jsou tři byty druhého vzorku.

Formát UART paketu s daty z akcelerometru je znázorněn v tabulce 3.3. Akcelerometr je tříosý a v této implementaci se vzorkují všechny tři osy, použité jsou ale pouze data z os x a y . Vzorek každé z os zabírá 2 byty. V rámci jednoho UART paketu akcelerometru jsou využité pouze 4 datové byty. Poslední 2 datové byty jsou nastaveny na hodnotu 0x255, což signalizuje, že osa z se v implementaci nevyužívá.

2	B_{x0}	B_{x1}	B_{y0}	B_{y1}	0xFF	0xFF	CRC0	CRC1
---	----------	----------	----------	----------	------	------	------	------

Tabulka 3.3: Formát UART paketu pro data z akcelerometru

■ CRC

Kontrolní součet CRC byl implementovaný za použití knihovny dostupné v nRF SDK, která používá CRC-16-CCITT s generujícím polynomem 0x1021 s počáteční hodnotou 0xFFFF. CRC je implementované efektivně pomocí předpočítané tabulky, při běhu se tudíž dělení generujícím polynomem neprovádí, a jenom se využívají již předpočítané hodnoty.

■ 3.3 WiFi-UART most

WiFi-UART most je koncept využívaný například pro ladění vestavěných aplikací, kde je fyzické připojení k zařízení nemožné nebo nežádoucí, třeba kvůli špatné přístupnosti. Koncept funguje tak, že výstup primárního zařízení, realizovaný UART rozhraním, je zrcadlen přes WiFi zobrazovacímu zařízení. Zobrazovací zařízení, které chce UART tok dat primárního zařízení číst, se připojí na přístupový bod, který tvoří sekundární zařízení podporující WiFi, a poslouchá na předem domluveném portu. Toto sekundární zařízení je fyzicky spojené přes rozhraní UART s primárním zařízením a zrcadlí přes WiFi data primárního zařízení.

V této implementaci byl využitý kód realizující ESP32 WiFi-UART most používající protokol TCP. Kód byl převzat z [1] a je napsaný v jazyce Wi-

ring, typickým pro Arduino. Převzatý kód podporuje OTA - Over-The-Air - aktualizace, což je v této práci nutnost, kvůli nemožnosti se k ESP32 připojit fyzicky a kód do ESP32 nahrát. Pro OTA aktualizace ESP32 je využito Arduino IDE.

Aby bylo možné zrcadlená data přes WiFi-UART most číst, byly vytvořeny skripty, které se starají o čtení, rekonstrukci a uložení zrcadlených dat. Skripty jsou implementované především v jazyce Python.

Pro připojení k přístupovému bodu, který ESP32 poskytuje, může být použitý jakýkoliv počítač s operačním systémem postavným na Linuxu. Při prvotních testech bylo využito Raspberry Pi 3, při testech se ale ukázalo, že použitá SD karta nestíhá zapisovat příchozí data, a že tedy bude lepší a pohodlnější použít notebook s operačním systémem Ubuntu 20.04.5 LTS.

Hlavní skripty, starající se o sběr a rekonstrukci nezpracovaných dat ze senzorů wattmetru, pracují následovně. V Bash terminálu se spustí skript, který pomocí příkazu *netcat* otevře relaci na dané IP adrese a daném portu. Skript pak dále poslouchá a čte data na tomto portu a převádí je na ASCII znaky, které pak pomocí příkazu *echo* vypisuje. Tento výstup se pomocí pipe (roury) předává dál jako vstup Python skriptu, který data dekoduje a zpracovává.

Příchozí data se čtou po jednotlivých bytech a využívá se kruhového zásobníku, který se postupně plní. V okamžiku, kdy přijde 9. byte, identifikuje se typ paketu, zda se jedná o data akcelerometru, nebo AD převodníku. Následně se spočítá CRC tohoto paketu pomocí knihovny [12] a ověří se, zda toto spočítané CRC odpovídá CRC paketu. Pokud si oba kontrolní součty odpovídají, složí se jednotlivé byty podle formátu paketu do konkrétní hodnoty výstupu senzoru. Tato hodnota se zapíše do souboru. Pokud si kontrolní součty neodpovídají, kruhový zásobník postupně zahazuje nejstarší byty a zepředu se plní byty novými, dokud si kontrolní součty neodpovídají. V testech byla integrita dat porušena jen velmi vzácně.

3.3.1 Čtení dalších relevantních ANT+ dat

Kromě dat točivého momentu a kadence se v rámci této práce sbírají i další relevantní data. Konkrétně to jsou data srdečního tepu, měřená hrudním pásem podporujícím ANT+, a zařazený převod z elektronické přehazovačky SRAM GX EAGLE AXS [19]. Ke sběru dat zařazeného převodu se používá

speciální hardware v podobě ANT+ USB dongle [5], který umí pracovat s protokolem ANT+. Ovladač ANT+ USB dongle a implementace ANT+ profilu elektronického řazení byla převzata z knihovny openant [21]. Data srdečního tepu byla změřena pomocí Garmin zařízení, protože knihovna openant [21] podporuje pouze jednu instanci ANT+ profilu, jež byla využita na čtení dat z elektronického řazení. Data z Garmin zařízení byla následně exportována do formátu .tex a byla dekodována pomocí Python knihovny [13].

Kapitola 4

Algoritmy zpracování dat

Bylo již zmíněno, že v této práci je výstup wattmetru realizován dvěma způsoby. Přes protokol ANT+ a přes WiFi-UART most.

Výstup ANT+ má podobu datových paketů protokolu ANT+ profilu BPWR, které nesou informace o aktuálním výkonu ve wattech a aktuální kadenci v otáčkách za minutu (RPM) jezdce. Tato data se posílají s nižší frekvencí, než s jakou se zrcadlí nezpracovaná data ze senzorů přes WiFi-UART most.

Druhý výstup, WiFi-UART most, zrcadlí nezpracovaná data.

ANT+ datový výstup vyžaduje pokročilejší zpracování sensorových dat pro výpočet kadence a výkonu. Následující část popíše přístupy a algoritmy využití při výpočtu těchto dat.

4.1 Výpočet kadence jezdce RPM

Akcelerometr je v této práci využitý k výpočtu kadence jezdce. Je umístěn na DPS, která je nalepená na klice jízdního kola, a umí měřit zrychlení ve třech osách, x , y a z . Pro výpočty se využívají pouze první dvě osy. I když se může zdát, že měření otáček kliky pomocí akcelerometru je jednoduché,

v reálném prostředí, kde se začnou objevovat vibrace a další nežádoucí vlivy, je to velice náročný úkol. V následujících částech bude popsán algoritmus, který se ukázal pro výpočet kadence jako nejlepší, a dále pak popíšu přístupy, které byly vyzkoušeny, ale ukázaly se jako nevhodné.

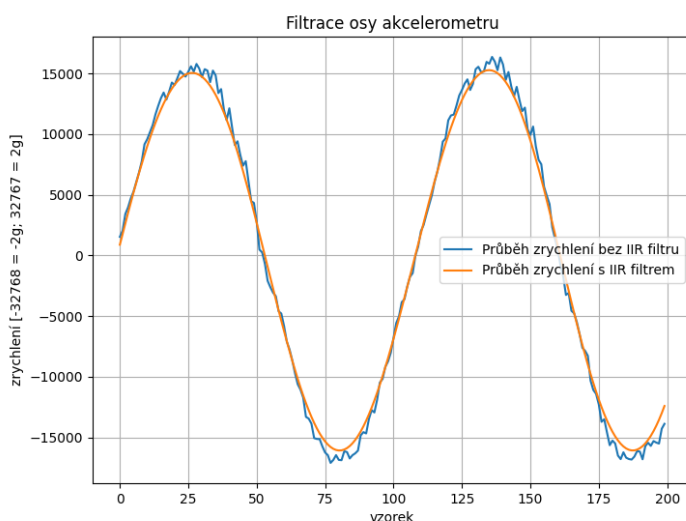
■ 4.1.1 Měření kadence hledáním časového posunutí průběhů zrychlení os akcelerometru vůči sobě

Hledání vzájemného časového posunutí signálů z os x a y se ukázalo být nejrobustnější a nejspolehlivější řešení pro měření otáček kliky kola. Algoritmus pracuje sekvenčně a to tak, že postupně sbírá vzorky akcelerometru a když má dostatek vzorků, v této práci konkrétně 100 vzorků z obou os, provede jednotlivé části popsané a vysvětlené níže. Vyhodnocení tedy probíhá každou sekundu. V okně, které vstupuje do algoritmu na vyhodnocení, předpokládáme, že signál je stacionární. Zároveň ale potřebujeme dostatečně široké okno, abychom mohli sledovat lokální extrémy podobnosti signálů při jejich vzájemném časovém posunutí. Délka okna 100 vzorků se ukázala jako dobrý kompromis mezi stacionaritou a dostatečnou šířkou pro porovnání podobnosti signálů.

■ IIR filtr

Jelikož v reálném prostředí nedostaneme pouze signál, jenž nás zajímá, musíme řešit, jak signál vyfytrovat tak, abychom co nejlépe izolovali užitečný signál od dalších nežádoucích signálů. Užitečný signál se pohybuje mezi 0.5 - 3 Hz a vibrace, způsobené nerovnostmi povrchu, se pohybují přibližně od 2.5 Hz výše. K filtraci byl využit IIR filtr, který představuje dobrý kompromis mezi kvalitou filtrace a řádem filtru. Řád filtru je důležitý parametr z hlediska výpočetní náročnosti, kritické pro vestavěná zařízení.

Byl použitý dolnoproputsní Butterworthův IIR filtr 2. řádu s mezní frekvencí 2 Hz. Koeficienty filtru byly vypočteny za pomoci Python knihovny SciPy [18]. Po návrhu koeficientů filtru bylo nutné implementovat algoritmus filtrace v jazyce C. Použitý algoritmus byl převzat z [4]. Tato cpp implementace byla upravena a přepsána do jazyka C.

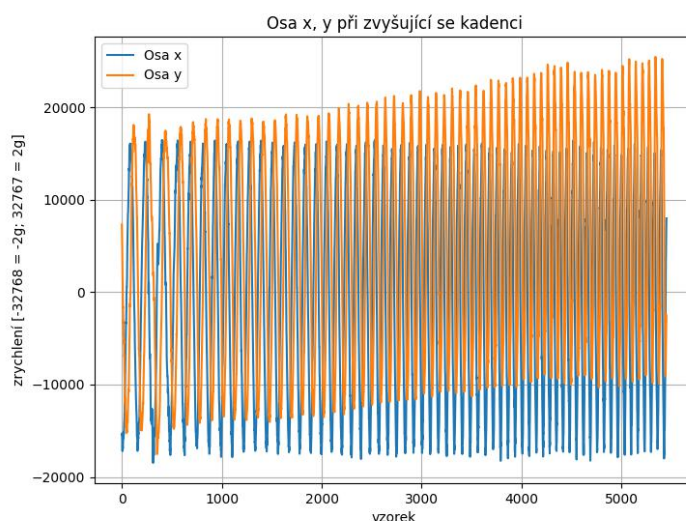


Obrázek 4.1: IIR filtrace

■ Vystředění odečtením průměru segmentu

Na obrázku 4.2 lze vidět průběhy zrychlení na osách akcelerometru pro zvyšující se kadenci jezdce. Při rychlejším šlapání se kolo začne vlivem pružnosti pneumatik a samotné geometrie kola pravidelně houpat. Toto pravidelné houpání, závislé na fázi šlapání, se projeví snížením či zvýšením amplitudy měřeného zrychlení na jedné z os akcelerometru. Osa akcelerometru, na které se houpání projeví, je ta osa, která je v okamžik průchodu těžiště kola rovnovážnou polohou kmitavého pohybu kola rovnoběžná se směrem houpání kola. Na ose kolmé ke směru síly způsobující houpání kola se změna amplitudy projeví minimálně.

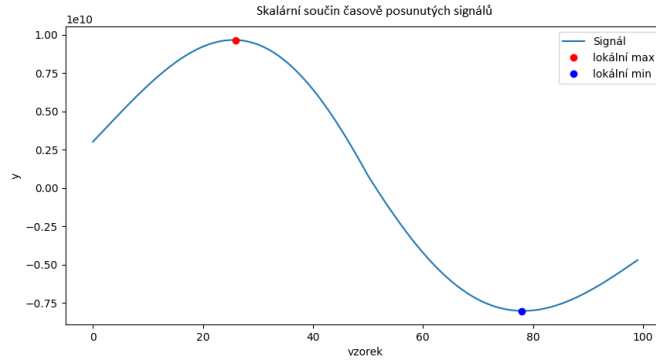
Tento problém byl vyřešen tak, že pro obě osy datového segmentu, vstupujícího do algoritmu, se spočítala střední hodnota segmentu. Ta se pak odečetla od každého vzorku segmentu. Tímto se signály vystředily kolem nuly.



Obrázek 4.2: Průběhy zrychlení na osách akcelerometru pro zvyšující se kadenci

■ Skalární součin časově posunutých signálů os x a y

Tento přístup umožňuje využít znalost řešeného problému. Víme, že na ose x musí být harmonický průběh sinu tíhové síly a na ose y musí být harmonický průběh cosinu tíhové síly. Je tedy přirozené, že pro časový posun odpovídající $\pm \frac{\pi}{2}$ jednoho ze signálů si budou průběhy nejvíce, respektive nejméně podobné. Algoritmus postupně posouvá jeden ze signálů v čase zpět a následně v čase dopředu, a pro každý tento posun spočítá skalární součin neposunutého signálu s posunutým signálem. Takto vznikne koeficient podobnosti signálů pro konkrétní časový posun. Graf koeficientů podobnosti pro časové posuny je vidět na grafu 4.3. Lokální extrémů nejbližě středu grafu odpovídají posunu jednoho ze signálů o $\pm \frac{\pi}{2}$, tudíž mezi lokálním maximem a minimem nejbližě středu grafu je vzdálenost π . Známe-li vzorkovací frekvenci FS akcelerometru, lze spočítat dobu, za kterou se klika otočila o 2π .



Obrázek 4.3: Skalární součin os x , y časově posunutých signálů

$$t = 2 * |IDX_{max} - IDX_{min}| * \frac{1}{FS} \quad (4.1)$$

Z toho pak spočítáme kadenci v otáčkách za minutu RPM

$$RPM = \frac{60}{t} \quad (4.2)$$

Důležitý parametr tohoto algoritmu je rozlišení kadence. Rozlišení je závislé na velikosti vzorkovací frekvence FS a aktuální kadenci. Pro příklad uvedu rozlišení kadence při vzorkovací frekvenci 100 Hz při kadenci 100 RPM.

$$\Delta cad = 100 - \frac{60}{0.59} = 1.69 \text{ RPM} \quad (4.3)$$

Tudíž jeden vzorek při kadenci 100 RPM a vzorkovací frekvenci 100 Hz odpovídá změně kadence o 1.69 RPM.

Algoritmus byl testovaný na rozsahu 55 - 130 RPM a je robustní. Výstupní kadence, která se posílá v ANT+ BPWR paketu, je ještě zpracována pomocí jednoduchého klouzavého průměru daného výrazem

$$out[N] = 0.8 * out[N - 1] + 0.2 * \text{aktuální kadence} \quad (4.4)$$

Pro rozšíření měřícího rozsahu by bylo nutné implementovat logiku nastavování velikosti datového segmentu dynamicky, pro pomalé kadence segment rozšířit, pro rychlé zkrátit.

■ 4.1.2 Ostatní metody

Následující metody byly vyzkoušeny, ale ukázaly se jako nevhodné pro tuto práci.

■ Úhlová diference

Měříme-li tíhové zrychlení na osách x a y , můžeme pomocí funkce `atan2` spočítat absolutní natočení akcelerometru. Spočítáme průměr úhlových diferencí mezi jednotlivými vzorky a tento průměr vynásobíme počtem vzorků, ze kterých jsme diference počítali. Z rovnice

$$\omega = \frac{N * DIF_{avg}}{N * \frac{1}{f_s}}, \quad (4.5)$$

kde N je počet vzorků v datového segmentu vstupujícím do výpočtu, f_s je vzorkovací frekvence akcelerometru a DIF_{avg} je průměrná úhlová diference mezi vzorky v rámci datového segmentu.

Tohle řešení se ukázalo jako nefunkční, zřejmě kvůli nevhodnosti algoritmu. Tento algoritmus by pravděpodobně fungoval v prostředí bez vibrací a výrazných nežadoucích vlivů s požadavkem aplikace na měření nižších rychlostí otáčení s vyšší přesností, než je tomu v této práci.

■ FFT

FFT, Rychlá Fourierova transformace je algoritmus využívaný pro spektrální analýzu signálů. V této práci bylo vyzkoušeno její použití s motivací, že na frekvenčním spektru se objeví dominantní frekvence, reprezentující

harmonický průběh tíhové síly na ose akcelerometru. Tato metoda nebyla příliš úspěšná, protože se ukázalo, že signály způsobené vnějšími vlivy, jako členitost terénu, vibrace nebo houpání kola mají podobné frekvence jako signál, představující harmonický průběh tíhové síly, tudíž tento signál nelze dobře ve spektru izolovat.

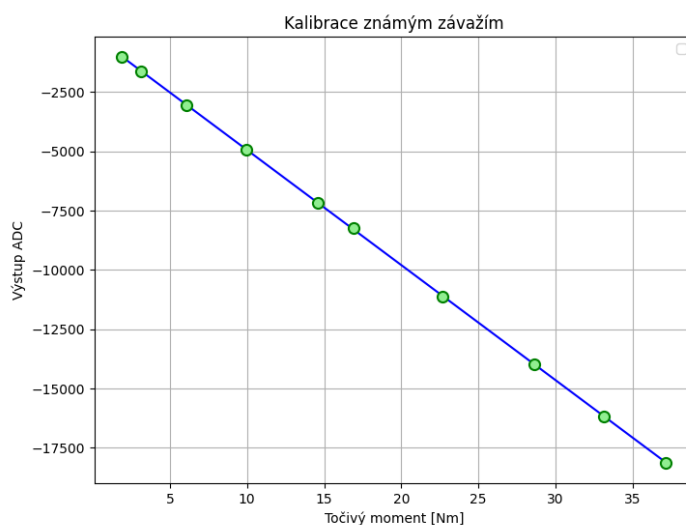
■ Proložení dat goniometrickými funkcemi

Byl testován také přístup prokládání měření z os x a y harmonickými funkcemi sinus a cosinus. Tento přístup byl ale zavrhnut kvůli náročnější C implementaci.

■ 4.2 Výpočet točivého momentu, výkonu a princip kalibrace

Výstup AD převodníku sice reprezentuje mechanické namáhání kliky, ale měří jej pouze v relativních jednotkách. Proto bylo nutné zjistit vztah mezi výstupem AD převodníku a točivým momentem aplikovaným na kliku. Tento převodní vztah byl zjištěn kalibrací závažím o známé hmotnosti s klikou o známé délce r . Jako závaží byla využita nádoba na vodu s objemem 30 litrů. Do této nádoby byla postupně přilévána voda, zjištěna hmotnost nádoby závěsnou vahou a následně byla nádoba zavěšena za střed osy pedálu namontovaného na kliku a zapsána hodnota z AD převodníku.

Z Hookova zákona víme, že dokud je deformace elastická, vztah mezi mechanickým napětím a deformací, která je přímo úměrná působící síle, je lineární. Díky této znalosti můžeme využít metodu nejmenších čtverců na proložení naměřených bodů přímkou s předpisem $y = cx + m$. Pro výpočet koeficientů proložení byla použita knihovna Numpy linalg [15]. Body proložené přímkou jsou znázorněné na obrázku 4.4.



Obrázek 4.4: Kalibrace proložením naměřených bodů přímkou ve smyslu nejmenších čtverců.

Zjištění vztahu mezi výstupem AD převodníku a působícím točivým momentem umožnilo data dále zpracovat. Aktuální výkon, atribut požadovaný ANT+ BPWR profilem, se v této práci počítá při každém volání obsluhy přerušení časovače. Všechny naměřené vzorky AD převodníku se převedou na točivý moment dle vztahu 4.6. Dále se spočítá průměr těchto točivých momentů. Aktuální výkon se pak spočítá podle vzorce

$$P = 2 * \frac{2\pi M * f}{60}, \quad (4.6)$$

,

kde M je průměr točivého momentu v datovém segmentu, r je délka kliky a f je frekvence otáčení kliky.

Tento výkon je ještě před předáním paketu ANT+ BPWR profilu zpracován průměrováním pohyblivého okna. Pohyblivé okno funguje jako kruhový zásobník s deseti posledními hodnotami výkonu, má tedy šířku 2.5 s. Výkon, který se předává paketu ANT+ BPWR profilu, je průměrem tohoto okna. Průměrování okna je použité proto, že frekvence, se kterou se volá obsluha přerušení časovače a počítá se aktuální výkon, se volá s výrazně vyšší frekvencí, než se kterou je jezdec schopen šlapat, tudíž se jednotlivé hodnoty výkonu hodně mění, protože velikost výkonu závisí na aktuální fázi šlapání.

Kapitola 5

Experimenty a měření dat

Tato část práce se bude věnovat experimentům, které měly za úkol ověřit funkčnost celého wattmetru a ukázat typy výstupů, které wattmetr poskytuje. Motivace pro jednotlivé typy experimentů je budoucí naměření a anotování datových sad reprezentujících konkrétní situace pro účel učení prediktoru řazení.

Všechny následující datové sady byly změřené wattmetrem na klice horského kola. Výjimkou je sekce 5.2. Tato část byla naměřená se starší generací wattmetru, využívané během bakalářského projektu [11]. Tento starší model je typický vyšším šuměním analogového signálu z tenzometrického můstku, než je tomu u primárního wattmetru, popisovaném v této práci. Verifikace měření točivého momentu byla provedena se starším modelem wattmetru kvůli poškození primárního wattmetru během sběru dat. Na výstupu tenzometrického můstku primárního wattmetru se začala akumulovat hodnota zatížení kliky, i když klika nebyla zatížena.

Poškození je zřejmě způsobené vadou mechanického spojení tenzometru s klikou. Pravděpodobně došlo k mechanickému poškození lepeného spoje z důvodu opakovaného dynamického namáhání kliky a špatného technologického postupu při lepení tenzometru a pracích s lepením spojených. Druhý potenciální důvod této akumulující se chyby by mohl být zapříčiněn také chybným technologickým postupem při izolaci tenzometru proti vlhkosti pomocí pryskyřice na tenzometru nalepené. Je možné, že pryskyřice disponuje určitým paměťovým efektem, který tenzometr mechanicky namáhá, i když zrovna není deformován kroucením kliky.

Z důvodu poškození primárního wattmetru nebylo naměřeno velké množství datových sad pro aplikaci učení prediktoru řazení. Tato data by totiž byla pro učení prediktoru nepoužitelná. V této části tedy budou ukázána data z wattmetru i z WiFi-UART mostu, ale je nutné brát ohled na skutečnost, že byl wattmetr poškozený, a že již nebylo možné tenzometr z ekonomicko-časových důvodů přelepit. V naměřených datech lze ale stále sledovat trendy, které budou pro budoucí prediktor řazení důležité, a proto zde budou diskutovány.

5.1 Verifikace měření kadence

Verifikace algoritmu počítajícího kadenci byla provedena opticky, pomocí natočeného videa. Cyklista jedoucí na stacionárních válkách šlapal jednu minutu s přibližně konstantní kadencí, počítanou pomocí algoritmu, a zároveň byl natáčen na video. Následně se z videa opticky spočítal počet otočení kliky a porovnal se z výstupem algoritmu. Výsledky jsou vidět v tabulce 5.1.

algoritmem měřená kadence	55	68	79	87	96	105	120
reálná kadence počítána opticky	53	67	77	86	93	105	120

Tabulka 5.1: Verifikace algoritmu počítajícího kadenci

MAE	RMS	ME	σ
1.29	1.65	1.29	0.59

Tabulka 5.2: Průměrná absolutní chyba, střední kvadratická chyba, průměrná chyba a rozptyl. ME a MAE jsou stejné, což ukazuje na možnost chybu potlačit zjištěním offsetu pro konkrétní intervaly měření

Algoritmus počítající kadenci se ukázal jako spolehlivý pro rozsah kadencí 55 - 130 RPM. Tento rozsah vyplývá přirozeně ze vzorkovací frekvence akcelerometru, velikosti datového segmentu vstupujícího do algoritmu na vyhodnocení a samotné podstaty algoritmu. Pro rozšíření rozsahu počítaných kadencí bude v budoucnu nutné dynamicky měnit velikost datového segmentu vstupujícího do algoritmu na vyhodnocení podle hodnoty předchozí spočítané kadence.

5.2 Verifikace měření točivého momentu

Ověření spolehlivosti měření točivého momentu bylo provedeno staticky s již zkalibrovaným zařízením ze sekce 4.2. Na kliku bylo zavěšováno závaží o známé hmotnosti pod různými úhly měřenými úhloměrem. Pokud uvážíme, že kliky i osa je spojující jsou dostatečně tuhé a působící síla nevykoná žádnou práci ve smyslu dočasného posunutí kliky z její klidové polohy vlivem pružnosti kliky a okolních komponent, jako jsou ložiska, můžeme říct, že síla působící na pedál je stejná, jako síla působící na osu spojující kliky kola. Tento princip můžeme využít pro numerické ověření měření točivého momentu pomocí tenzometrů.

$$ADC * m_{lsq} + c_{lsq} = m * g * \cos(\alpha) * r, \quad (5.1)$$

kde ADC představuje hodnotu výstupu AD převodníku, m_{lsq} a c_{lsq} koeficienty proložené přímky, m je hmotnost závaží, pověšeného za pedál, α úhel, který svírá klika s vodorovným směrem a r je délka kliky.

V tabulce 5.3 je porovnán točivý moment z výstupu AD převodníku a očekávaná teoretická hodnota točivého momentu.

úhel	Změřeno	Ground truth
0°	5.4765	5.4163
16°	5.3747	5.2065
38°	4.4391	4.2681
90°	0.1429	0
-20°	5.444	5.0897
-26°	5.3065	4.8681
-43°	4.2777	3.9612
-60°	3.0099	2.708

Tabulka 5.3: Verifikace výpočtu výkonu nepřímo ověřením vztahu výstupu ADC a aplikovaného točivého momentu na osu klik

MAE	RMS	ME	σ
0.244	0.7685	0.244	0.0142

Tabulka 5.4: Průměrná absolutní chyba, střední kvadratická chyba, průměrná chyba a rozptyl. ME a MAE jsou stejné, což ukazuje na možnost chybu potlačit zjištěním offsetu pro konkrétní intervaly měření

Při verifikaci byla použita klika se starší generací wattmetru, který je typický

vyšším šumem v analogovém signálu. Klikla byla spojená osou s druhou klikou a tato soustava 5.1 byla upevněna. Následně bylo na měřicí kliku zavěšováno závaží pod různým úhlem měřeným úhloměrem, a tato měření byla zaznamenána. Nepřesnosti přisuzuji šumění v analogovém signálu a také technologickému postupu při lepení tenzometru, ten byl totiž hodně podobný tomu pro primární wattmetr, jen s rozdílem, že na klice se starší generací wattmetru se zatím neprojevila hrubá chyba.



Obrázek 5.1: Verifikace měření točivého momentu známým závažím

5.3 Sběr dat

Celkem bylo naměřeno 6 datových sad. 2× jízda ze sedla, 2× start a 2× normální jízda. Sady mají délku trvání v řádu jednotek minut. Každá datová

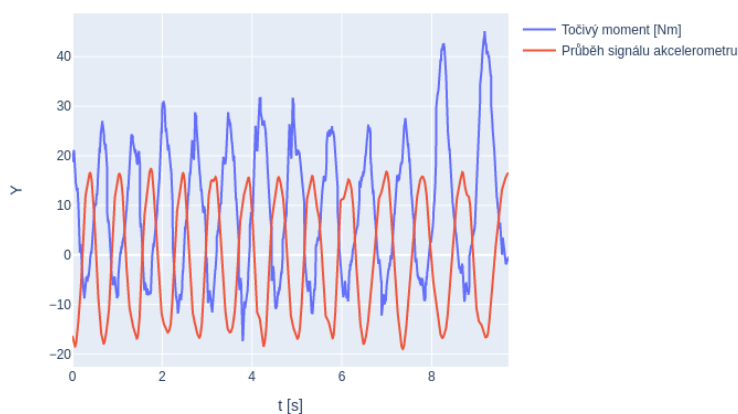
sada obsahuje .txt soubory s daty. Z nezpracovaných dat je to *strain_gauge.txt* se vzorkovací frekvencí 280 Hz, pak *accel_x.txt* a *accel_y.txt*, obsahující nezpracovaná data z os akcelerometru na frekvenci 100 Hz. Ze zpracovaných dat jsou to *cadence.txt*, *HR.txt*, *power.txt* a *shift_data.txt*. Tyto soubory obsahují zpracovaná data na frekvenci 4 Hz.

Všechny .txt soubory obsahují časové značky, které slouží synchronizačním skriptům, které data časově synchronizují.

5.3.1 Jízda ze sedla

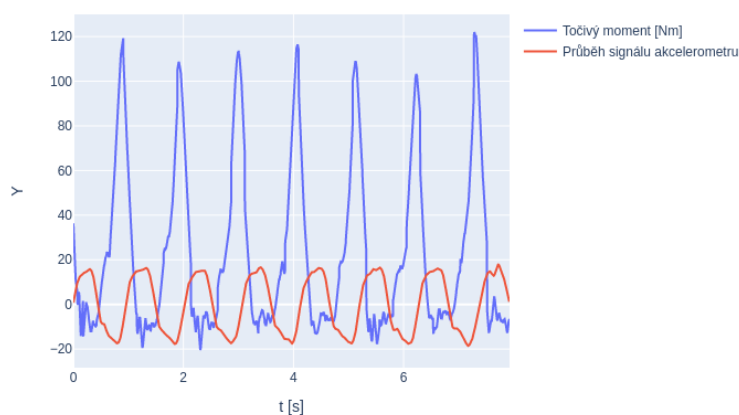
Jízda ze sedla je typická posunutím těžiště jezdce. Posunutí těžiště způsobí změnu úhlu, pro který nastává maximum točivého momentu při každém otočení kliky. Pro přechod z jízdy v sedle na jízdu ze sedla je také typické zařazení těžšího převodu a zvýšení jezdce aplikovaného točivého momentu za snížení kadence. Na obrázcích 5.2 a 5.3 můžeme vidět, jak se pro jízdu v sedle a ze sedla vzájemně změnila poloha lokálních extrémů točivého momentu a zrychlení na ose akcelerometru, nepřímo reprezentující úhel.

Průběh točivého momentu a průběh zrychlení osy x akcelerometru



Obrázek 5.2: Vzájemná poloha průběhů točivého momentu a zrychlení na ose akcelerometru při jízdě v sedle

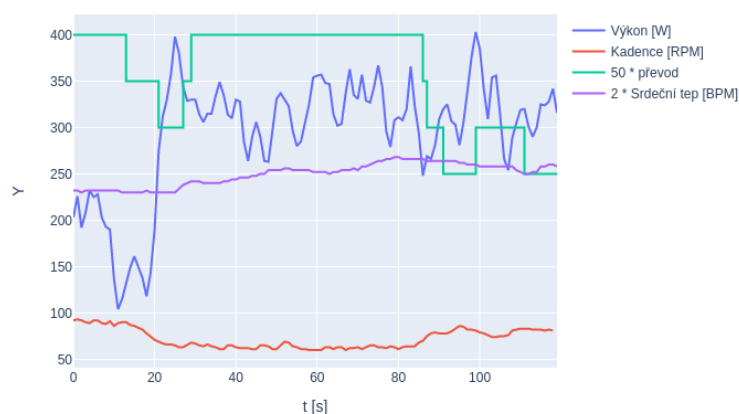
Průběh točivého momentu a průběh zrychlení osy x akcelerometru



Obrázek 5.3: Vzájemná poloha průběhů točivého momentu a zrychlení na ose akcelerometru při jízdě ze sedla. Lze také sledovat nárůst maximálního točivého momentu za snížení otáček při porovnání s jízdou v sedle

Na obrázku 5.4 lze vidět v čase 25 s přechod z jízdy v sedle na jízdu ze sedla a převod zpět v čase 85 s. Na grafu si lze všimnout zařazení o 2 stupně těžšího převodu, snížení kadence a nárůstu výkonu při jízdě ze sedla. U přechodu zpět jde vidět zařazení o 3 stupně lehčího převodu a zvýšení kadence.

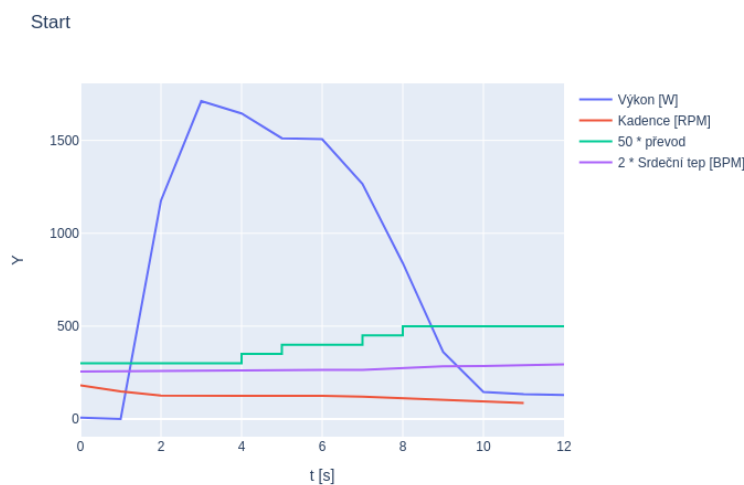
Jízda ze sedla



Obrázek 5.4: Přechod na jízdu ze sedla a zpět. Kolem 25 s jde vidět zařazení těžšího převodu - začíná jízda ze sedla. Kolem 85 s jde vidět přeřazení na lehčí převod - jízda ze sedla končí a jezdec dále jede v sedě.

5.3.2 Start

Start představuje další typickou situaci, kde automatická predikce řazení dává velký smysl. Jezdec je totiž ve stresové situaci a musí se soustředit jak na svoje okolí, tak na to, aby co nejrychleji akceleroval, což vyžaduje co nejefektivnější volbu převodů. Na obrázku 5.5 je vidět start z klidového stavu. Wattmetr ukazoval vyšší výkon, než s jakým jezdec doopravdy jel, zřejmě kvůli výše zmíněnému poškození wattmetru. Maximální výkon testovacího jezdce se totiž pohybuje kolem 1350 W a byl změřen komerčním wattmetrem.

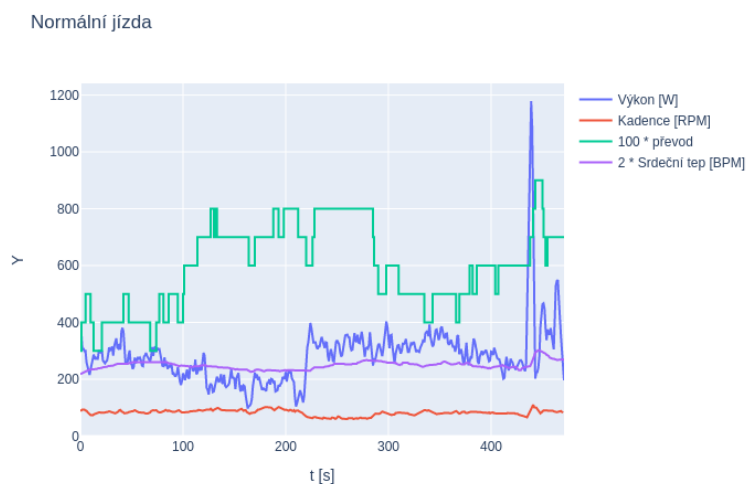


Obrázek 5.5: Start

Maximální výkon závisí přímo úměrně na hmotnosti jezdce. V případě profesionálních silničních cyklistů se maximální výkon při finálním spurtu může pro 78 Kg jezdce pohybovat až kolem 1900 W, je ale nutné brát ohled na to, že jezdec je při finálním spurtu již značně vyčerpán.

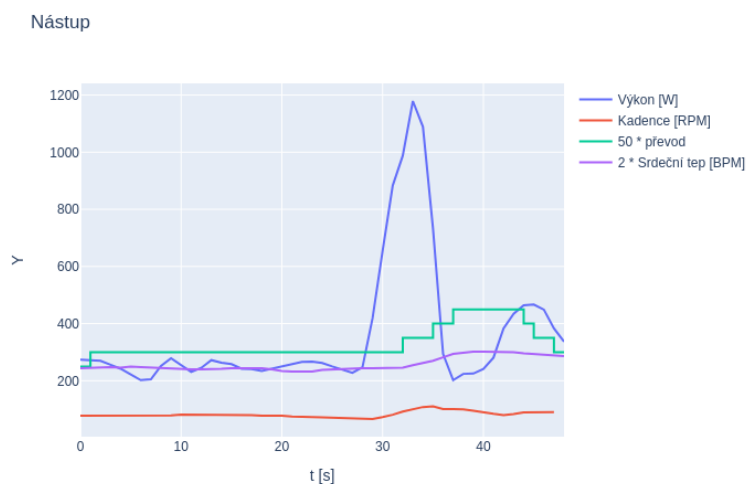
5.3.3 Normální jízda

Tento záznam reprezentuje normální jízdu, která obsahuje z části i jízdu ze sedla a nástup, který lze vidět na konci záznamu. Jezdec se snažil jet s konzistentním výkonem s výjimkou nástupu na konci záznamu.

**Obrázek 5.6:** Normální jízda

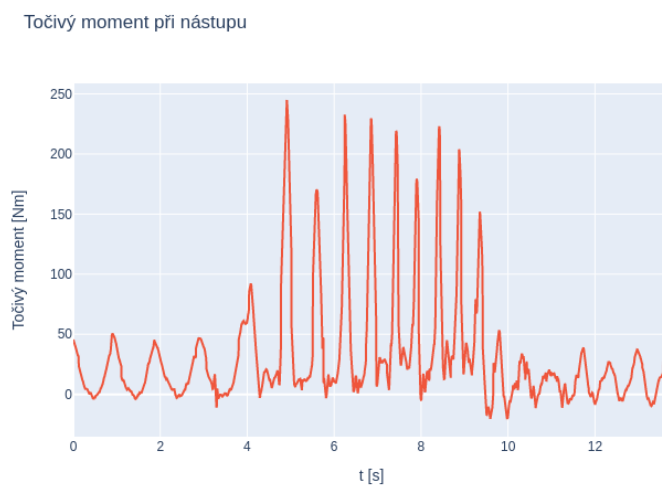
5.3.4 Nástup

Při nástupu se jezdec snaží co nejrychleji akcelarovat. V závodě je cílem nástupu ujet ostatním jezdčům, ale příklad této situace může být i situace, kdy chce jezdec co nejrychleji odjet z nebezpečného místa, například z kruhového objezdu nebo křižovatky. Rozdíl mezi startem a nástupem je ten, že start začíná z klidového stavu, kdežto při nástupu se jezdec již nějakou rychlostí pohybuje, a z této rychlosti chce maximálně akcelarovat. Na obrázku 5.7 lze vidět volbu převodů jezdce při maximální akceleraci. Nejvyšší výkon nástupu na obrázku 5.7 se pohybuje kolem 1200 W.



Obrázek 5.7: Nástup

Obrázek 5.8 ukazuje průběh točivého momentu pro nástup na obrázku 5.7.



Obrázek 5.8: Točivý moment při nástupu

Lze si všimnout, že točivý moment na obrázku 5.8 není rovnoměrný a osciluje. Je to způsobené tím, že jezdec má nejvyšší točivý moment ve chvíli, kdy jsou kliky orientované horizontálně a nejnižší, teoreticky nulový točivý moment ve chvíli, kdy jsou kliky orientované vertikálně.

Kapitola 6

Nedostatky a budoucí práce

Během této práce se projevily nedostatky stávajícího řešení, které budou v budoucnu řešeny. Mezi hlavní nedostatky patří technologický postup lepení tenzometru, kde stávající technologický postup částečně zapříčinil poškození tenzometrické části wattmetru. Nalepení tenzometru je nejvíce kritická část konstrukce každého wattmetru, tudíž na tento bod bude v budoucnu brán ohled nejvíce.

Do kvality signálu z tenzometrického můstku se přímo promítá kvalita reference, která napájí tenzometrický můstek. Měnič využívaný stávajícím řešením se ukázal jako nevhodný kvůli svému oscilujícímu výstupu, který se navzorkuje společně se signálem z tenzometrů jako šum. V příštím modelu wattmetru bude měnič nahrazen přesnou napěťovou referencí, kterou lze sehnat jako integrovaný obvod. Například REF3425SQDBVRQ1.

Poslední bod, týkající se návrhu na zlepšení kvality signálu z tenzometrického můstku, je využití teploměru, dostupného v AD převodníku pro teplotní kompenzaci. Měnící se teplota okolí, a tedy i kliky a DPS, se projeví malým statickým offsetem na výstupu tenzometrického můstku, který lze továrním nastavením teplotních kalibračních koeficientů eliminovat.

Z algoritmicke části bude vylepšen algoritmus počítající kadenci, využitím dynamicky se měnící délky datového segmentu, vstupujícího do algoritmu. Toto vylepšení umožní počítat kadenci na širším rozsahu, než je tomu doposud. Také bude algoritmu přidána schopnost rozlišit, zda se klika kola pohybuje, nebo ne, protože aktuální implementace počítá kadenci neustále, což způsobuje výpočet nenulové kadence i v momentě, kdy se klika netočí.

Softwarová část umožňuje široká vylepšení. Mezi hlavní patří nahrazení čipu ESP32 samotným nRF52832, který při efektivní implementaci dokáže jak počítat data a starat se o ANT+ přenos, tak odesílat data přes Bluetooth. WiFi-UART most se tedy změní na Bluetooth most. Efektivní implementací se myslí využití PPI (Programmable Peripheral Interconnect), přerušování a DMA pro čtení dat zcela bez nutnosti používat procesor a využití SoftDevice, které podporuje zároveň protokol Bluetooth i ANT+.

Možná vylepšení z pohledu implementace ANT+ BPWR profilu jsou počítání dalších volitelných dat ANT+ BPWR profilu, týkajících se především dynamiky šlapání jezdce a efektivity využívání jezdce aplikovaného točivého momentu na užitečný výkon. Dynamika šlapání je veličina ukazující, jak plynule jezdec šlape, a efektivita je poměr mezi užitečnou a celkovou prací, kterou jezdec koná.

Mezi další důležité budoucí práce patří robustní verifikace kvality měření wattmetru. Tato verifikace bude provedena na speciálním statickém trenážeru, který disponuje výstupem, ve kterém jsou obsažena všechna relevantní data ANT+ BPWR profilu. Následným porovnáním dat se určí přesnost a kvalita dat, které wattmetr poskytuje.

Jelikož primární motivací za konstrukcí wattmetru je sběr dat pro naučení prediktoru řazení, je tento poslední bod také velmi důležitý a navazuje na předchozí body. Jakmile bude ověřeno, že wattmetr má dostatečnou přesnost a jeho výstup je kvalitní, bude naměřeno dostatečné množství datových sad obsahujících konkrétní situace, jako byly popisované v experimentech. Následně se tato data využijí pro učení prediktoru řazení, který bude umět jezdce v řazení nahradit. Tento prediktor bude realizovaný přenosným počítačem, napojeným na bezdrátovou komunikaci mezi páčkou elektronické přehazovačky a elektronickou přehazovačkou, a bude využívat data z wattmetru a dalších periférií pro rozhodování o zařazení.

Kapitola 7

Závěr

Tato práce obsahovala hardwarovou stránku konstrukce wattmetru 2.8, 2.9, měřícího výkon cyklisty, implementaci softwaru wattmetru, implementaci softwaru zpracovávající data z WiFi-UART mostu a implementaci softwaru algoritmů výpočtu dat.

Návrh a konstrukci hardwarových částí DPS wattmetru hodnotím kladně. Všechny komponenty spolu komunikovaly po fyzických sběrnících bez problémů. Jediný problém se objevil v analogové části DPS, kde se použitý měnič jako reference tenzometrického můstku ukázal jako zcela nevyhovující, kvůli svému oscilujícímu výstupu. I přes snahu oscilace potlačit přidáním dvou keramických kondenzátorů s kapacitami $0.1 \mu F$ a $0.01 \mu F$ co nejbližší výstupu měniče, se nepovedlo oscilace potlačit.

Stránku softwarové implementace hodnotím velmi kladně. Použitý jednocíp patří k pokročilým a práce s ním není jednoduchá. I přesto se povedlo zprovoznit sběr dat ze všech senzorů, implementaci ANT+ BPWR profilu a odesílání dat přes WiFi-UART most. Také se povedlo efektivně implementovat rutiny sběru dat tak, že se spolu nedostávají do kolizí, a celý cyklus od sběru dat, přes výpočet až po odeslání dat, je spolehlivý a robustní.

Chtěl bych také zmínit náročnost návrhu a implementace algoritmu pro výpočet kadence. Návrh a následná implementace tohoto algoritmu zabrala nejvíce času z této práce a i přesto, že princip algoritmu je triviální, nebylo vůbec lehké jej vymyslet a následně implementovat, částečně i kvůli množství potenciálních řešení, která musela být vyzkoušena.

Správnost měření kadence wattmetrem byla provedena opticky a prokázala, že výpočet kadence funguje správně na intervalu 55 - 130 RPM. Verifikace měření výkonu byla provedena nepřímo ověřením vztahu mezi působící silou a měřeným točivým momentem pro různé úhly kliky, kde působící sílu generovalo závaží známe hmotnosti. Tato verifikace byla navíc provedena se starší verzí wattmetru a měla za úkol především ukázat, že princip měření výkonu z točivého momentu získaným z výstupu AD převodníku je validní a spolehlivý. Kvalitnější verifikace měření dat pomocí speciálního statického trenážeru nebo wattmetru v převodníku nebyla provedena kvůli nedostupnosti těchto zařízení ve fázi testování wattmetru.

Povedlo se úspěšně naměřit všechna data, která nejsou závislá na výstupu tenzometru. Jmenovitě je to kadence, zařazený převod, srdeční tep a data GPS. Data závislá na výstupu tenzometru sice byla naměřena, ale pro další zpracování, zejména pro učení prediktoru řazení, jsou nepoužitelná z důvodu hrubé chyby, kterou obsahují. Tato chyba byla způsobena mechanickou závadou mechanického spojení tenzometru s klikou, špatným technologickým postupem izolace tenzometru proti vlhkosti nebo mechanickou závadou tenzometru samotného. Přezkoumání důvodu bude vyžadovat rozebrání na kliku nalepeného wattmetru. I přes problém s tenzometrickou částí wattmetru byla data, závislá na výstupu tenzometru naměřena, protože na nich lze i přes hrubou chybu, projevující se akumulujícím se offsetem sledovat zajímavé trendy.

Příloha A

Literatura

- [1] AlphaLima. ESP32-Serial-Bridge. <https://github.com/AlphaLima/ESP32-Serial-Bridge>.
- [2] ANT+ Alliance. ANT+ defined | ANT+, n.d. <https://www.thisisant.com/developer/ant-plus/ant-antplus-defined>.
- [3] Paul Beard and Thomas Povey. Direct shaft torque measurements in a transient turbine facility. *Measurement Science and Technology*, 22:035107, 02 2011.
- [4] Develancer. filtfilt: A Python library for zero-phase digital filtering using the filtfilt function. <https://github.com/develancer/filtfilt>.
- [5] Garmin. Garmin USB-dongle ANT+, 2024. <https://www.garmin.com/cs-CZ/p/10997>.
- [6] HBM Test and Measurement. Linear strain gauges with 1 measurement grid, 2024.
- [7] J. HE CZKO, J. KRYS TEK, and T. KROU PA. Crank-based cycling powermeter - construction and validation. Prague, 2022. Czech Technical University – CTU in Prague, Faculty of Civil Engineering, Department of Mechanics.
- [8] Chuck Holliday. Low power, highly accurate bicycle power meter. *Analog Dialogue*, 2013. <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/low-power-highly-accurate-bicycle-power-meter.html>.
- [9] Lukáš HRBOTICKÝ. Wattmetry pro cyklistiku, 2022. <http://hdl.handle.net/11012/207473>, VUT, Brno.

- [10] Art Kay and Tim Green, editors. *Analog Engineer's Pocket Reference*. Texas Instruments Incorporated, Dallas, TX, USA, 3rd edition, 2015. https://me1.at.ua/dla_forymov_3/TI.pdf.
- [11] Josef Macháč. Otestování možností pro měření dat pomocí vlastního cyklistického wattmetru, semestrální práce, 2023. CTU in Prague.
- [12] Mariusz 'marioosh' Łączak, Hans Mulder. Crc16 checksum library for python, 2023. <https://pypi.org/project/crc16/>.
- [13] Stefano Marsili. Tcxreader, 2022. <https://pypi.org/project/tcxreader/>.
- [14] Nordic Semiconductor. nRF5 SDK. Website, Accessed 2024.
- [15] Travis E. Oliphant et al. Numpy, 2022. <https://numpy.org/doc/stable/reference/generated/numpy.linalg.lstsq.html>.
- [16] Aron Primas. Cyklistický měřič výkonu. CTU in Prague, bachelor thesis.
- [17] Pavel Ripka. *Senzory a převodníky*.
- [18] SciPy Contributors. scipy.signal.butter. 2022. <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.butter.html>.
- [19] SRAM. GX Eagle AXS, 2024. <https://www.sram.com/en/sram/mountain/series/gx-eagle-axs>.
- [20] Texas Instruments. Ads1220 4-channel, 2-kSPS, low-power, 24-bit ADC with integrated PGA and reference. Technical documentation, 2016. Available: <https://www.ti.com/product/ADS1220>.
- [21] Tigge. OpenANT: Python library for ANT protocol communication. <https://github.com/Tigge/openant>, 2024.