

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 10: Elektrotechnika, elektronika a telekomunikace

# Zařízení pro vzdálené průběhové měření spotřeby

# STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 10: Elektrotechnika, elektronika a telekomunikace

## Zařízení pro vzdálené průběhové měření spotřeby

### Remote Consumption Reading Device

**Autor:** Tadeáš Fryčák

**Škola:** Gymnázium Jana Opletala, Litovel, Opletalova 189

**Kraj:** Olomoucký

**Konzultanti:** Jakub Dostál  
RNDr. František Smolka

Litovel 2024

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracoval samostatně a použil jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů.

V Litovli dne: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Tadeáš Fryčák

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval svým kolegům, Jakubu Dostálovi a RNDr. Františku Smolkovi, za příležitost účastnit se tohoto projektu a za poskytování cenných rad. Také bych chtěl poděkovat společnosti AgreFlex za financování tohoto projektu.

## **Anotace**

Tato práce se zabývá vývojem zařízení, jehož mechanická konstrukce a elektronické zapojení umožňuje získávání stavových a průběhových informací z elektronických elektroměrů a plynometrů. APU může vzdáleně odečítat například naměřené spotřeby a výroby elektrické energie nebo spotřeby plynu. Tyto informace mohou být získávány prostřednictvím rozhraní fungujících na principu odečítání impulzních výstupů (například metrologické LED, rozhraní S0, ...). Následně jsou tyto údaje bezdrátově přenášeny nízkopříkonovou rádiovou sítí typu LPWAN do cloudového datového úložiště.

## **Klíčová slova**

Vzdálené měření spotřeby; průběhové měření spotřeby; vzdálený odečet spotřeby; agregace flexibility; energetika

## **Annotation**

This thesis deals with the development of a device whose mechanical structure and electronic circuitry enable the acquisition of status and time-based information from electronic electricity meters and gas meters. The APU can remotely read, for example, measured electricity consumption and production or gas consumption. This information can be obtained through interfaces functioning on the principle of reading pulse outputs (such as metrological LEDs, S0 interface, etc.). Subsequently, this data is wirelessly transmitted via a low-power, wide-area network (LPWAN) to a cloud-based data repository.

## **Keywords**

Remote reading of consumption; energy consumption; aggregation of flexibility; energy sector

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>8</b>
Současný stav techniky . . . . .	8
Cíle práce . . . . .	9
<b>1 Definice pojmů</b>	<b>10</b>
1.1 Agregace flexibility . . . . .	10
1.1.1 Kladná agregace flexibility . . . . .	10
1.1.2 Záporná agregace flexibility . . . . .	10
1.1.3 Agregáčn� blok . . . . .	10
1.2 Elektroměr . . . . .	10
1.2.1 Rozhraní metrologick� diody . . . . .	10
1.2.2 Rozhraní S0 . . . . .	11
1.2.3 Optick� rozhraní . . . . .	11
1.3 Spotřebov� profil NB-IoT �ipu . . . . .	11
1.3.1 PSM . . . . .	11
1.3.2 DRX . . . . .	12
<b>2 Konstrukce zařízení</b>	<b>13</b>
2.1 Volba protokolů a rozhraní . . . . .	13
2.1.1 Komunikační protokol . . . . .	13
2.1.2 Rozhraní elektroměru . . . . .	13
2.2 Volba sou�astek . . . . .	14
2.2.1 Výběr NB-IoT �ipu . . . . .	14
2.2.2 Výběr baterie . . . . .	14
2.2.3 Výběr superkondenzátoru . . . . .	15
2.2.4 Výběr měniče . . . . .	16
2.2.5 Výběr mikrokontroléru . . . . .	16
2.2.6 Výběr ode�t�ac�ho prvku . . . . .	17
2.2.7 Výběr antény pro NB-IoT komunikaci . . . . .	18
2.2.8 Výběr antény pro LoRa komunikaci . . . . .	18
2.3 Návrh desky plošného spoje . . . . .	19
2.3.1 Verze 0.1 a 0.2 . . . . .	19
2.3.2 Verze 1.0 . . . . .	19
2.3.3 Verze 1.1 . . . . .	19
2.3.4 Verze 1.2 . . . . .	20
2.3.5 Verze 1.3 . . . . .	20

2.3.6	Verze 2.0 . . . . .	21
2.3.7	Verze 2.1 . . . . .	22
2.4	Návrh obalu zařízení . . . . .	24
2.4.1	Obal zařízení od designéra . . . . .	24
2.4.2	Vlastní návrh obalu zařízení . . . . .	25
2.5	Návrh sondy pro rozhraní metrologické diody . . . . .	28
2.6	Tisk . . . . .	30
2.7	Návrh etikety . . . . .	30
2.8	Optimalizace a sériová výroba . . . . .	31
<b>3</b>	<b>Pohled uživatele</b>	<b>33</b>
3.1	Instalace zařízení . . . . .	33
3.2	Grafické materiály . . . . .	35
<b>4</b>	<b>Analýzy zařízení</b>	<b>36</b>
4.1	Měření spotřeby zařízení . . . . .	36
4.1.1	Měření na Univerzitě Palackého . . . . .	36
4.1.2	Superkondenzátor jako měřič spotřeby . . . . .	37
4.2	Experiment pro predikci výdrže baterie . . . . .	38
4.2.1	Predikce výdrže baterie . . . . .	39
4.3	Experimenty za ztížených podmínek . . . . .	40
4.3.1	Vysoká teplota . . . . .	40
4.3.2	Nízká teplota . . . . .	40
4.3.3	Venkovní podmínky . . . . .	40
	<b>Závěr</b>	<b>41</b>
	<b>Diskuze</b>	<b>42</b>
	<b>Seznamy</b>	<b>43</b>
	Seznam použitých zdrojů . . . . .	43
	Seznam použitého vybavení . . . . .	48
	Seznam obrázků . . . . .	49
	Seznam tabulek . . . . .	50
	Seznam rovnic . . . . .	51
	Seznam zkratk . . . . .	52
	Seznam příloh . . . . .	53

# Úvod

S rostoucím trendem stavění elektráren využívajících obnovitelné zdroje energie [1] a rostoucím zájmem o elektromobilitu [2, 3] v České republice začíná být složitější balancovat elektrizační soustavu. To způsobuje nejen zvýšené náklady na vyvážení sítě [4], ale také i zvýšenou četnost extrémních jevů v síti, což postupně zvyšuje riziko velkého blackoutu [5].

Aby bylo možné energetickou síť udržitelně balancovat i v budoucnu, přicházejí postupně nová řešení. Jedno z těchto řešení umožní novela energetického zákona zřejmě již od roku 2025 [6]. Jedná se o vznik nové entity – nezávislého agregátora flexibility.

Nezávislý agregátor flexibility bude následně moci sdružovat ovládání stovek vysokopříkonových spotřebičů po celé České republice pro vytvoření agregačního bloku, s kterým již bude moci pomáhat vyrovnávat odchylky v síti.

A právě pro ovládání jednotlivých vysokopříkonových zařízení potřebuje agregátor flexibility několik vlastních hardwarových řešení. Nejprve potřebuje být informován o energetickém profilu koncového zákazníka pro vytvoření predikčních modelů k ovládání spotřebičů. A následně potřebuje zařízení, jež zapojí před vysokopříkonové spotřebiče, což mu je následně umožní vzdáleně ovládat.

## Současný stav techniky

Někteří dodavatelé buď neřeší problematiku průběžného měření elektrické energie vůbec, nebo používají speciální, technicky složité a drahé elektroměry, které jsou vybavené některými „standardními“ komunikačními technologiemi, jako jsou GSM/LTE, Wi-Fi nebo MBus wireless. Jedním z příkladů takového elektroměru je Landis+Gyr ZMF100 [7].

Navíc, dle § 6 odst. 2, § 6 odst. 1 písm. c), § 4 odst. 4 písm. c) vyhlášky č. 359/2020 Sb. o měření elektřiny - znění od 1. 1. 2024, je zřejmé, že v nových elektroměrech je vyžadované odesílání dat pouze jednou za měsíc [8–10], což znamená, že stávající zařízení nejsou na o tři řády nižší periodu odečítání dimenzovaná.

V současnosti dostupná řešení, umožňující online sledování spotřeby elektrické energie čtením informací z elektroměrů, využívají pro sběr informací o spotřebě často optická (IR) rozhraní. Tato řešení mají však své **nevýhody**, jako je například jejich **časté odpojování** při pravidelném ročním odečtu spotřeby od distributora nebo **omezení na minimální periodu odečítání 15 minut**.

Pro přenos informací stávající technologie často vyžaduje složitou infrastrukturu, která je založená na nespolehlivém Wi-Fi komunikačním standardu nebo na napájení ze sítě 230 V, ke kterému zákazníci nemají přístup bez povolení dodavatele. Pokud jsou pro napájení



použity baterie, při nastavení krátké periody odesílání dat je nutné je měnit každých 2 až 6 měsíců.

## Cíle práce

A právě proto jsem si jako cíl stanovil vytvoření zařízení pro vzdálené odečítání spotřeby z elektronických elektroměrů, které veškerá omezení současné techniky a potřeby pro agregaci flexibility splní. Jelikož žádné z aktuálně dostupných rozhraní elektroměrů nedisponuje napájením pro externí zařízení a z legislativních důvodů není možné u standardních elektroměrových instalací připojit měřící zařízení na 230 V, je nutné, aby měřící zařízení mělo vlastní zdroj napájení.

Z těchto důvodů jsem si stanovil za cíl vytvořit zařízení, které:

- Bude efektivně napájeno z bateriového systému s dlouhou výdrží (**delší než 5 let**) při periodě odesílání dat do cloudového úložiště **5 min**.
- Bude moci odečítat veškerá impulzní rozhraní.
- Bude **cenově dostupné**, tudíž **vhodné pro sériovou výrobu**.
- Bude svým návrhem co nejvíce **ekologické**.
- Bude designově moderní.
- Bude připravené na komunikaci i s nově vznikajícími rozhraními.

# 1. Definice pojmů

## 1.1 Agregace flexibility

Agregace flexibility je schopnost regulace spotřeby/výroby velkého množství zařízení/elektráren ve stejném a zároveň krátkém časovém intervalu. Tyto řízené manipulace v odběru/výrobě elektrické energie se následně mohou použít pro vyrovnání odchylky v elektrické síti.

### 1.1.1 Kladná agregace flexibility

Jedná se o snížení spotřeby nebo o zvýšení výroby [11]. V konkrétním případě se může jednat například o vypnutí / odložení startu vysokopříkonových spotřebičů (elektromobil se začne nabíjet o 15 min později, podlahové vytápění se na 15 min přeruší, ...).

### 1.1.2 Záporná agregace flexibility

Jedná se o zvýšení spotřeby nebo o snížení výroby [11]. V konkrétním případě se může jednat například o odpojení solárních elektráren.

### 1.1.3 Agregáčn  blok

Agregátor flexibility musí agregovat tolik zařízení, aby byl schopn  při aktivaci snížit/zvýšit spotřebovanou energii o násobky 1 MW.

## 1.2 Elektroměr

Elektroměr m r  protékající spotřebu přes vodič/vodiče, na kter /kter  je p ipojen . Elektronick  elektroměry (tj. majoritn  část všech elektroměrů v y u ivan ch distributory) obsahují několik komunikačních rozhraní.

### 1.2.1 Rozhraní metrologick  diody

Toto rozhraní je u elektroměrů nejobvyklej  a také je ze své podstaty nejjednoduší. Dokáže předat připojenému zařizení pouze informaci o spotřebovan m  inn m výkonu<sup>1</sup>.

Jeho princip je zalo en  na ud van  spotřeby energie počtem sv eteln ch pulzů diody um st n  na viditeln  a uživateli p ístupn   ast  elektroměru. Ka d y jeden pulz diody indikuj  spotřebovan  energii o ur it , předem stanoven  hodnot . Tato hodnota je vždy

---

<sup>1</sup>Existují i elektroměry, u nichž se nachází dvě metrologick  diody – první z nich určuje spotřebu činného výkonu a druh  z nich spotřebu jalového výkonu

uvedena v okolí metrologické diody; může se jednat například o hodnotu  $10\,000 \frac{\text{imp.}}{\text{kWh}}$ , což znamená, že jeden světelný pulz diody poskytuje informaci o spotřebování energie o velikosti  $0.1 \text{ Wh}$ .

Pokud zaznamenanáme počet pulzů za daný časový interval (tj. vypočítáme frekvenci pulzů), získáme informaci o průběhové spotřebě.

### 1.2.2 Rozhraní S0

Toto rozhraní pracuje na stejném principu jako rozhraní metrologické diody. Rozdíl mezi nimi tvoří pouze způsob připojení. Zatímco k rozhraní metrologické diody může zařízení připojit i běžný uživatel, k rozhraní S0 je vyžadovaný pracovník distribuční společnosti nebo poučený elektrikář.

Dále je také typicky odlišná velikost přepočítávacího koeficientu – u rozhraní metrologické diody činí typicky  $10\,000 \frac{\text{imp.}}{\text{kWh}}$  (někdy  $20\,000 \frac{\text{imp.}}{\text{kWh}}$ ,  $40\,000 \frac{\text{imp.}}{\text{kWh}}$ , případně ještě  $1\,000 \frac{\text{imp.}}{\text{kWh}}$ ), u rozhraní S0 je granularita typicky 10x menší (nejčastěji se tedy jedná o přepočec  $1\,000 \frac{\text{imp.}}{\text{kWh}}$ ).

Toto rozhraní je určeno výhradně zákazníkovi, distributor jej nepoužívá ani k odečtům a ani k testům.

### 1.2.3 Optické rozhraní

Optické rozhraní je oproti rozhraní metrologické diody a rozhraní S0 obousměrné. Vyčítání funguje na základě čtení registrů. Bohužel je oproti předchozím značně limitované – například u společnosti ČEZ Distribuce lze jeho hodnoty vyčítat pouze jednou za 15 minut [12].

Distributor toto rozhraní využívá pro účely odečítání spotřeby, může se proto stát, že technik připojené odečítací zařízení odpojí a již nezapojí zpět.

## 1.3 Spotřebový profil NB-IoT čipu

Jelikož NB-IoT je založené na poměrně komplexní celulární síti, je i spotřebový profil NB-IoT čipů různorodý.

### 1.3.1 PSM

Režim PSM je stav, kdy je NB-IoT čip v režimu hlubokého spánku. V tomto režimu nedokáže komunikovat a může být vzbuzen pouze z externího zdroje (za pomoci specifického pinu) nebo vypršením časovače T3412, jehož délka je dohodnuta s celulární sítí při inicializaci.

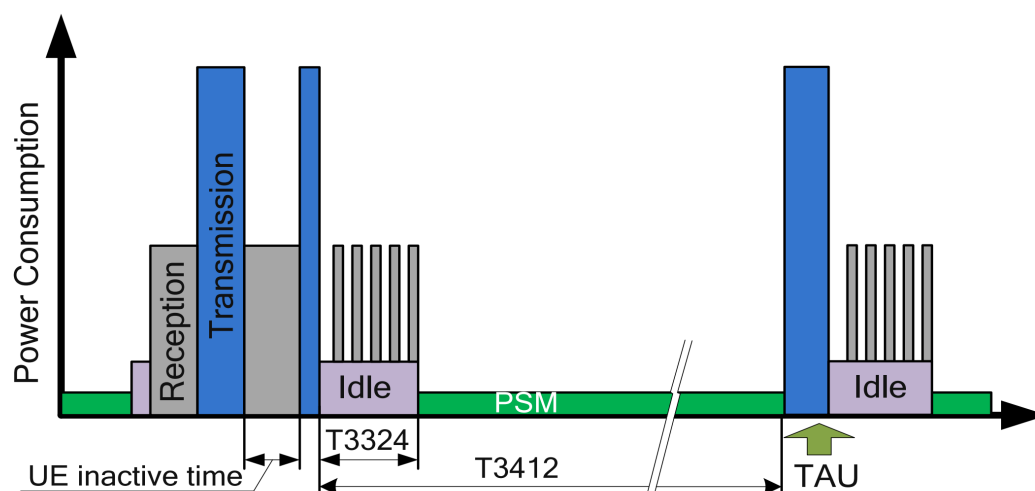


Obrázek 1.1: Ukázka optického rozhraní a metrologické diody na elektroměru

Jelikož se jedná o režim, ve kterém je NB-IoT čip nejdéle v době, je nutné, aby byla spotřeba v tomto režimu co nejnižší.

### 1.3.2 DRX

DRX se dělí na cDRX a iDRX. cDRX je možnost úspory energie v připojeném stavu a iDRX (někdy také nazývaná jako eDRX, případně eiDRX) je mezistupeň mezi aktivním/připojeným stavem a PSM. NB-IoT čip je v tomto režimu periodicky na příjmu, může proto s nízkou latencí začít komunikovat. Na obrázku 1.2 je možné vidět eDRX terminovanou časovačem T3324.



Obrázek 1.2: Ukázka průběhu spotřeby NB-IoT čipu [13]

## 2. Konstrukce zařízení

### 2.1 Volba protokolů a rozhraní

#### 2.1.1 Komunikační protokol

Zařízení je cíleně konstruované na vzdálené online odečítání spotřeby s latencí do 5 minut. Je proto nutné, aby umělo komunikovat s vnějším prostředím. Aby bylo zařízení energeticky nenáročné a spolehlivé, rozhodl jsem se pro komunikaci zvolit jednu z technologií LPWAN. K datu rozhodnutí byly k dispozici čtyři možnosti: LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, Cat-M.

Vlastnost	LoRaWAN	Sigfox	NB-IoT	Cat-M
Pokrytí ČR	70 %	94 %	100 %	93 %
Energetická náročnost	Velmi nízká	Nízká	Nízká <sup>1</sup>	Střední <sup>1</sup>
Omezení objemu dat <sup>2</sup>	4 zprávy/den	140 zpráv/den	~8 MB/měsíc	~8 MB/měsíc
Cena	240 Kč/rok	300 Kč/rok	44.9 Kč/rok	44.9 Kč/rok

Tabulka 2.1: Porovnání vlastností některých LPWAN sítí [14–20]

V době výběru technologie měl Sigfox několik problémů se spolehlivostí a zanedlouho byl jeho provoz ukončen [21]. Jelikož zařízení vzdáleně odečítající stavy spotřeby bude vždy staticky umístěné a bude odesílat data o malých objemech, není nutné využívat energeticky náročnější Cat-M. Z finálního úzkého výběru jsem zvolil technologii NB-IoT z důvodu dobrého pokrytí i v těžko přístupných podmínkách (například ve sklepení).

#### 2.1.2 Rozhraní elektroměru

Aby bylo možné odečítat data o průběhové spotřebě, je nutné se nejprve napojit na rozhraní elektroměru. Elektroměry mají různé druhy komunikačních rozhraní – z těch používaných na elektroměrech od distributorů se jedná typicky o rozhraní s metrologickou diodou, rozhraní S0 a optické rozhraní [12].

Jelikož u optického rozhraní je omezení na minimální periodu odečtu 15 min a pro připojení na rozhraní S0 je nutná přítomnost elektroinstalatéra nebo pracovníka distribuční společnosti, rozhodli jsme se pro rozhraní metrologické diody. Metrologická dioda má nejbenevolentnější podmínky – není zde omezená perioda odečtu a při odečtech elektroměrů distributory nedochází k jejímu odpojení.

<sup>1</sup>NB-IoT a Cat-M mají například oproti Sigfoxu kvůli specifikům daných celulární sítí mnohem vyšší variabilitu ve spotřebě; energetická náročnost je proto zvolena jako střední

<sup>2</sup>S poskytovateli je možné individuálně vyjednat podmínky většího objemu, avšak cena se zvýší

## 2.2 Volba součástek

### 2.2.1 Výběr NB-IoT čipu

Při rešerši jsem našel dva<sup>3</sup> významné výrobce NB-IoT čipů – Ublox a Quectel.

Čip	Výrobce	PSM	Idle, DRX=1.28s	Aktivní, 23dBm
SARA-N310	Ublox	3 $\mu\text{A}$	1.5 mA	-
SARA-R510S	Ublox	0.5 $\mu\text{A}$	1.5 mA	135 mA
SARA-R520	Ublox	0.5 $\mu\text{A}$	2.2 mA	135 mA
SARA-R410M	Ublox	3 $\mu\text{A}$	1.2 mA	140 mA
BG95	Quectel	3.9 $\mu\text{A}$	13.5 mA	162 mA
BG77	Quectel	3.4 $\mu\text{A}$	15.8 mA	188 mA
BG600L	Quectel	4 $\mu\text{A}$	1.47 mA	156 mA
BC68	Quectel	3 $\mu\text{A}$	0.5 mA	280 mA
BC65	Quectel	4 $\mu\text{A}$	1 mA	280 mA
BC660K	Quectel	0.8 $\mu\text{A}$	0.22 mA	98 mA

Tabulka 2.2: Porovnání klíčových parametrů NB-IoT čipů [13, 22–30]

Při porovnání klíčových parametrů spotřeby čipů od jednotlivých výrobců jsem zvolil čip BC660K, který díky svému unikátnímu designu [31] exceluje mezi ostatními v úspoře energie.

### 2.2.2 Výběr baterie

Jelikož APU jednotka bude umístěná na místech, kde standardně není přítomné jakékoli rozhraní pro napájení (připojení k napájení je typicky možné pouze u podružných elektroměrů, jež nejsou vlastněné distribučními společnostmi), je nutné, aby zařízení fungovalo ze svého vlastního napájecího systému.

Abych naplnil stanovený cíl – výdrž baterie alespoň 5 let při velmi nízké periodě odesílání dat do cloudu (5 min) – musel jsem zvolit baterii s takovým chemickým složením, které má co nejnižší samovybíjení.

Aktuálně jsou na trhu dostupné nejčastěji tyto druhy baterií:

$$v_b(s_b, t) = (1 - s_b)^{12 \cdot t}$$

Rovnice 2.1: Predikovaná kapacita baterie za 5 let

Z tohoto důvodu jsem se rozhodl zvolit primární baterie  $\text{LiSOCl}_2$ , které jsou určené právě

<sup>3</sup>K datu 04/2024 je v přípravě už i čip od firmy ST

Typ baterie	Samovybíjení/měsíc	Kapacita za 5 let
<i>Li – Ion</i>	0.35-2.5 %	22-81 %
<i>Li – Pol</i>	10 %	0.2 %
<i>LiSOCl<sub>2</sub></i>	0.08 %	95 %
<i>LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub></i>	0.17 %	90 %
<i>LiFePO<sub>4</sub></i>	1-3 %	16-55 %
<i>NiCd</i>	15-20 %	0 %
<i>NiMH</i>	30 %	0 %
Olověné	4-6 %	3-9 %
Alkalické	0.3 %	84 %

Tabulka 2.3: Porovnání samovybíjení u vybraných druhů baterií [32–35]

pro aplikace s nízkým odběrem proudu a při správném režimu odběru proudu dokáží vydržet i desítky let [36].

Následně jsem provedl rešerši na eshopech od několika distributorů elektronických součástek v ČR (Mouser, Digikey, Farnell, TME, ...) a vybral jsem *LiSOCl<sub>2</sub>* baterii s nejvyšší kapacitou. Konkrétně se jedná o baterii ER34615H [37].

Parametr	Hodnota parametru
Napětí	3.66 V
Kapacita	20 Ah
Samovybíjení	<1 %/rok
Energetická hustota	700 Wh/kg
Max. kontinuální odběr proudu	150 mA
Max. pulzní odběr proudu	300 mA

Tabulka 2.4: Výběr důležitých parametrů baterie ER34615H [37]

### 2.2.3 Výběr superkondenzátoru

Baterie *LiSOCl<sub>2</sub>* bohužel nedokážou poskytnout vysoký odběr proudu. Navíc při čerpání vyššího proudu je účinnost přenosu energie nízká (například při odběru 100 mA je účinnost již jen 60 %).

Z tohoto důvodu jsem se rozhodl provést rešerši možností. Zjistil jsem, že několik inženýrů se rozhodlo pro implementaci tzv. přečerpávacího mechanismu. Ten sestával z velké *LiSOCl<sub>2</sub>* baterie, pumpy (měniče s omezovačem proudu) a následně menších nabíjecích baterií (například *NiCd*).

Při podrobném zkoumání jsem však zjistil několik energetických nedokonalostí. Použité měniče měly většinou účinnost okolo 90 % a při nabíjení a vybíjení *NiCd* baterií se ztratilo dalších 10-20 % kapacity.

Přišel jsem proto s vlastním nápadem – přečerpáváním do superkondenzátoru. Některé superkondenzátory totiž mají velmi nízké samovybíjení [38] a zároveň účinnost nabíjení a vybíjení je při nízkých proudech téměř 100 %.

Dále mě napadlo spojit superkondenzátor paralelně přímo s baterií, což by ušetřilo dalších 10 %. Dlouhou dobu jsem však nemohl najít žádný superkondenzátor, který by měl menší samovybíjení než  $1 \mu A$  (spotřeba zařízení ve spánku totiž měla být okolo  $4 \mu A$ , byl by to proto výrazný spotřebový nepoměr), rozumně velkou kapacitu a byl by dimenzovaný na nominální napětí  $LiSOCl_2$  baterie (3.6 V).

Avšak po desítkách prohlédnutých produktů a datasheetů jsem našel SLC1025 [38] – superkondenzátor, který má samovybíjení dokonce  $0.25 \mu A$  a jeho maximální dovolené napětí je vyšší než 3.6 V.

## 2.2.4 Výběr měniče

Při důkladné rešerši existujících produktů pro napájecí blok jsem objevil jedinečný step-up měnič TPS61094 [39]. Tento měnič má hned několik skvělých parametrů:

- možnost transformace napětí již od 0.7 V – díky tomuto parametru může APU jednotka využít naprosté maximum dostupné energie (bez tohoto měniče by mohla čerpat energii z baterie pouze do 2.2 V, poté by přestal fungovat NB-IoT čip),
- klidový odběr proudu **pouhých 60 nA**,
- možnost vypnutí – například v případě, že je napětí na vstupu vyšší než požadované napětí, měnič se automaticky zkratuje, čímž zvýší efektivitu transformace na téměř 100 %,
- ve vypnutém (průchozím) režimu navíc spotřebovává **pouhé 4 nA**,
- jeho účinnost je až 92 % pro velikost odběru APU.

Díky tomuto měniči je tak APU ekologičtější, jelikož se snaží vybíjet nenabíjitelnou baterii na naprosté minimum.

## 2.2.5 Výběr mikrokontroléru

Mikrokontrolér jsem při rešerši vybíral dle nejnižší spotřeby a dle úrovně dokumentace značky – při špatné dokumentaci je totiž velmi jednoduché opomenout například automaticky otevřené debugovací porty, což jednoduše způsobí nemalé nepříjemnosti. Z těchto důvodů jsem zvolil značku ST a její řadu STM32L.

Řada STM32L je složena z několika podřad, proto jsem je všechny důkladně analyzoval a zvolil řady STM32L4 a STM32L4+, které mají ze všech nejmenší spotřebu. Dále jsem



Řada	SRAM	Spotřeba při spuštění	Spotřeba ve spánku
STM32L0	až 20 kB	až 49 $\mu\text{A}/\text{MHz}$	0.32 $\mu\text{A}$
STM32L4	až 320 kB	až 28 $\mu\text{A}/\text{MHz}$	0.34 $\mu\text{A}$
STM32L4+	až 640 kB	až 41 $\mu\text{A}/\text{MHz}$	0.39 $\mu\text{A}$
STM32L5	256 kB	až 62 $\mu\text{A}/\text{MHz}$	3 $\mu\text{A}$

Tabulka 2.5: Porovnání řad L0, L4, L4+ a L5 [40–44]

zjistil, že existuje řada STM32WLE5, což je vlastně řada STM32L4 doplněná o SX1262 umožňující bezdrátovou komunikaci pomocí LoRy, kterou jsem chtěl využít pro komunikaci s dalšími zařízeními ovládajícími vysokopříkonové spotřebiče.

Řada	SRAM	Spot. s LDO	Spot. s DC/DC	Spot. ve spánku
STM32L412	40 kB	79 $\mu\text{A}/\text{MHz}$	28 $\mu\text{A}/\text{MHz}$	0.95 $\mu\text{A}$
STM32L422	40 kB	79 $\mu\text{A}/\text{MHz}$	-	0.95 $\mu\text{A}$
STM32WLE5	64 kB	110 $\mu\text{A}/\text{MHz}$	41 $\mu\text{A}/\text{MHz}$	1.07 $\mu\text{A}$
STM32L431	64 kB	84 $\mu\text{A}/\text{MHz}$	-	1.28 $\mu\text{A}$
STM32L432	64 kB	84 $\mu\text{A}/\text{MHz}$	-	1.28 $\mu\text{A}$
STM32L433	64 kB	84 $\mu\text{A}/\text{MHz}$	36 $\mu\text{A}/\text{MHz}$	1.28 $\mu\text{A}$
STM32L442	64 kB	84 $\mu\text{A}/\text{MHz}$	-	1.28 $\mu\text{A}$
STM32L443	64 kB	84 $\mu\text{A}/\text{MHz}$	-	1.28 $\mu\text{A}$
STM32L451	160 kB	84 $\mu\text{A}/\text{MHz}$	-	2.4 $\mu\text{A}$
STM32L452	160 kB	84 $\mu\text{A}/\text{MHz}$	36 $\mu\text{A}/\text{MHz}$	2.4 $\mu\text{A}$
STM32L4x5	320 kB	110 $\mu\text{A}/\text{MHz}$	41 $\mu\text{A}/\text{MHz}$	2.95 $\mu\text{A}$

Tabulka 2.6: Několik významných parametrů mikrokontrolérů (spot. = spotřeba) [42, 45]

Jelikož je STM32WLE dobrý kompromis ve velikosti SRAM, spotřeby a má integrovaný čip SX1262, zvolil jsem právě řadu STM32WLE, konkrétně čip **STM32WLE5CxUy** (x = velikost flash paměti, y = teplotní výdrž), který má větší pouzdro a lze jej zapájet i ručně.

## 2.2.6 Výběr odečítacího prvku

Hlavní rozhraní, pro které je APU jednotka vytvořená, je rozhraní metrologické diody. Toto rozhraní funguje na bázi blikání LED, kdy jeden světelný impuls odpovídá určitému množství spotřebované energie.

Jako odečítací element jsem zvolil fototranzistor. Fototranzistor je oproti fotorezistoru dostatečně rychlý a dokáže tak zaznamenat i ta nejkratší bliknutí metrologické diody. Oproti fotodiodě má poté nízký parazitní proud ve tmě (pouze desítky nA) a zároveň neprodukuje napětí, což by v případě silného zdroje světla mohlo v krajním případě i zničit procesorovou jednotku. Experimentoval jsem s desítkami různých fototranzistorů,

po několika testech – kdy jsem zjistil, jak moc reagují jednotlivé fototranzistory na stejnou úroveň osvětlení – jsem se rozhodl pro NPN fototranzistor SFH310-2/3 [46].

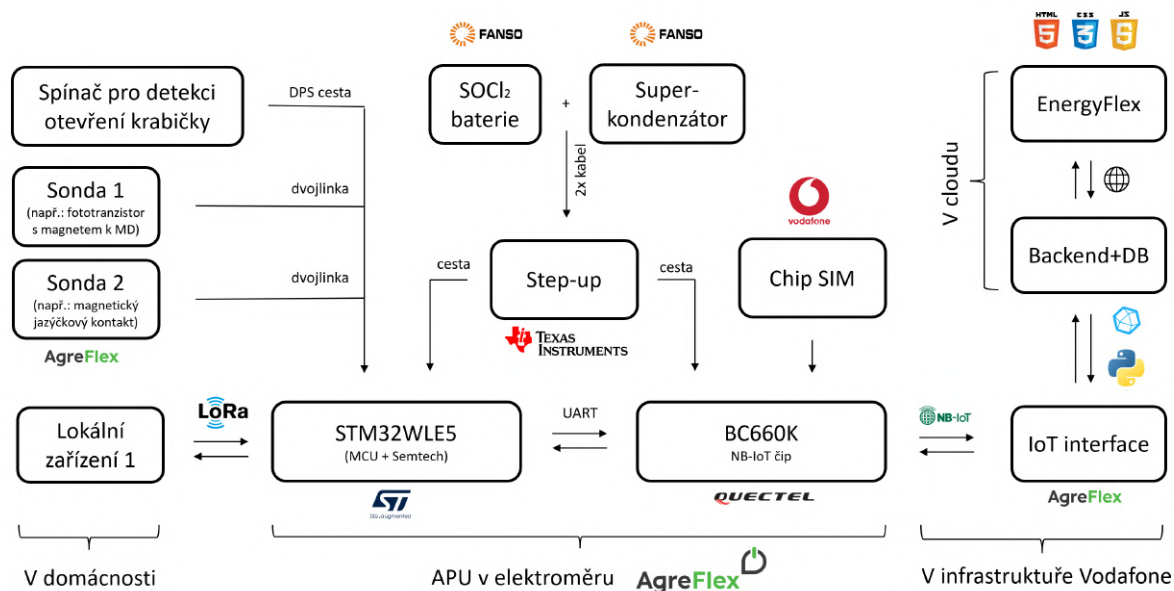
Aby bylo možné detekovat přítomnost osvětlení, je v NPN fototranzistoru připojen pull-up rezistor. Díky nízkému parazitnímu proudu tohoto fototranzistoru je tak spotřebováván proud pouze v případě, že metrologická dioda svítí (jednotky  $\mu A$ ).

## 2.2.7 Výběr antény pro NB-IoT komunikaci

Primární komunikace (s periodou 5 minut) bude probíhat přes NB-IoT. Anténu k NB-IoT čipu jsem proto vybíral tak, aby měla co nejvyšší zisk (účinnost) pro frekvenční rozsah pásma B20 (pásmo, ve kterém je NB-IoT v České republice provozováno). Dále jsem anténu vybíral dle přítomnosti kloubu (v prvních verzích APU bylo nutné mít anténu v úhlu  $90^\circ$ ) a také její velikosti (některé antény byly větší než samotné zařízení). Dále jsem vybíral pouze z antén se SMA konektorem, jelikož anténa bude umístěná vně krabičky. Na základě těchto parametrů jsem vybral anténu 2JW1024 [47].

## 2.2.8 Výběr antény pro LoRa komunikaci

Pro LoRa komunikaci jsem hledal anténu opět s nejvyšším ziskem (účinností) okolo 868 MHz. Nakonec jsem zvolil DPS anténu, protože komunikace přes tuto anténu bude probíhat až 100x méně často než komunikace přes NB-IoT a není proto nutné vybavovat zařízení dražším (a lepším) vybavením. Jako finální anténu jsem zvolil 2JE41 [48].



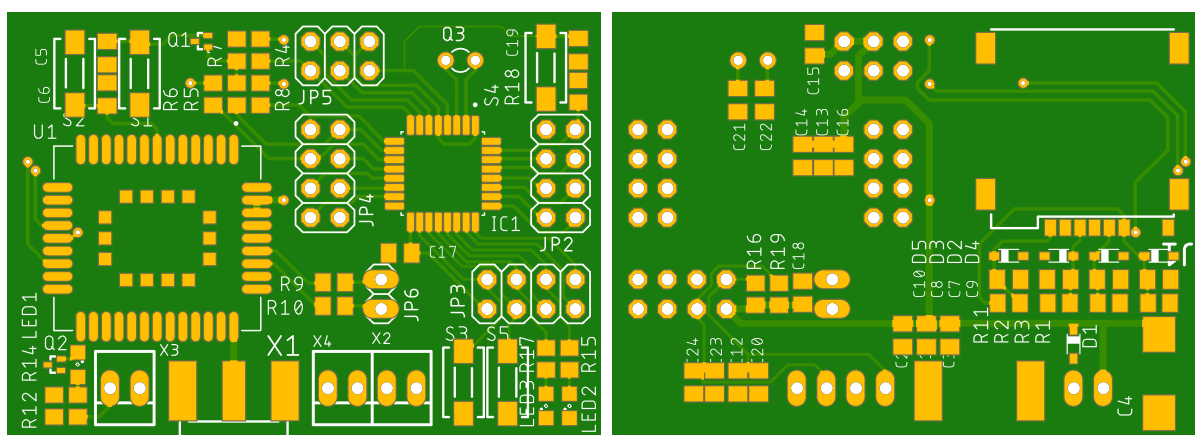
Obrázek 2.1: Blokové a koncepční schéma APU

## 2.3 Návrh desky plošného spoje

Desky plošného spoje jsem navrhoval nejprve v programu Eagle, od pozdějších verzí jsem přešel na program KiCAD. Veškeré DPS jsem navrhoval tak, aby je bylo možné kdykoli zapájet ručně, což jsem využil například při pájení prototypů, které se ekonomicky nevyplatilo nechat zapájet firmou.

### 2.3.1 Verze 0.1 a 0.2

Tyto verze byly první dva pokusy o vytvoření APU. Při navrhování první z verzí jsem však došel do stavu, kdy již nebylo možné návrh desky plošného spoje dokončit. Proto jsem vytvořil verzi 0.2, ve které již bylo možné navrhnout veškerá spojení. Před dokončením jsme si ale stanovili další cíl, který by měla jednotka APU implementovat – možnost komunikace přes rozhraní LoRa. Proto i tato verze zůstala nedokončená.



(a) Horní strana

(b) Spodní strana

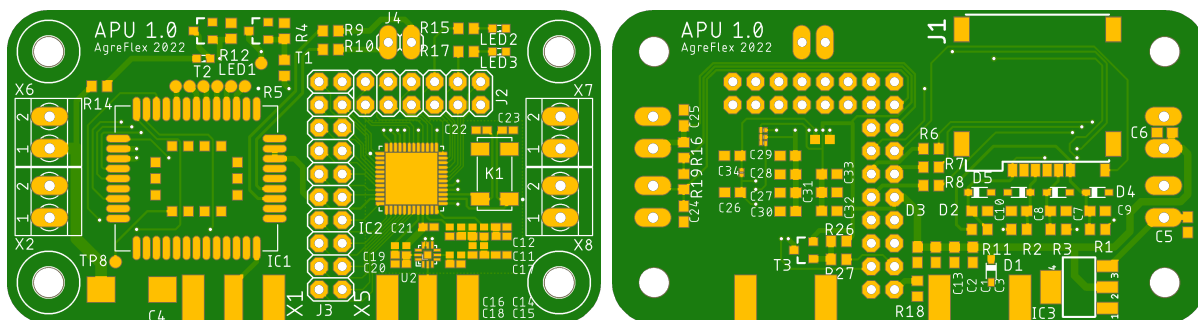
Obrázek 2.2: Návrh desky plošného spoje APU 0.2

### 2.3.2 Verze 1.0

Ve verzi 1.0 jsem poprvé implementoval možnost nové konektivity – LoRu. Protože jsem tyto DPS pájel celé ručně, vyrobil jsem pouze dva plně funkční kusy. Jelikož se jednalo o mou první DPS s STM32, preventivně jsem v této verzi vyvedl veškeré piny na pinheader pro jednoduché debugování.

### 2.3.3 Verze 1.1

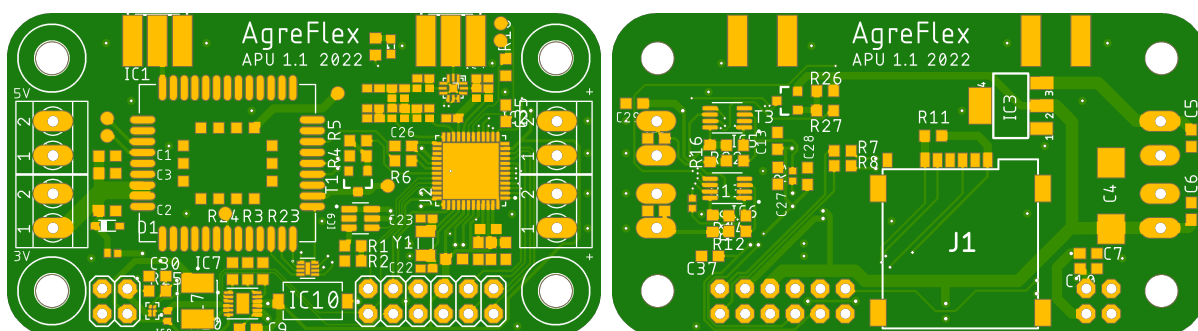
Ve verzi 1.1 jsem opravil několik chyb verze 1.0, přidal první verzi měniče a dále jsem odstranil debugovací konektor, jelikož již nebyl potřeba (ponechal jsem vyvedené pouze programovací piny). Této verze jsem vyrobil pouze jeden zkušební prototyp, který jsem zapájel ručně.



(a) Horní strana

(b) Spodní strana

Obrázek 2.3: Návrh desky plošného spoje APU 1.0



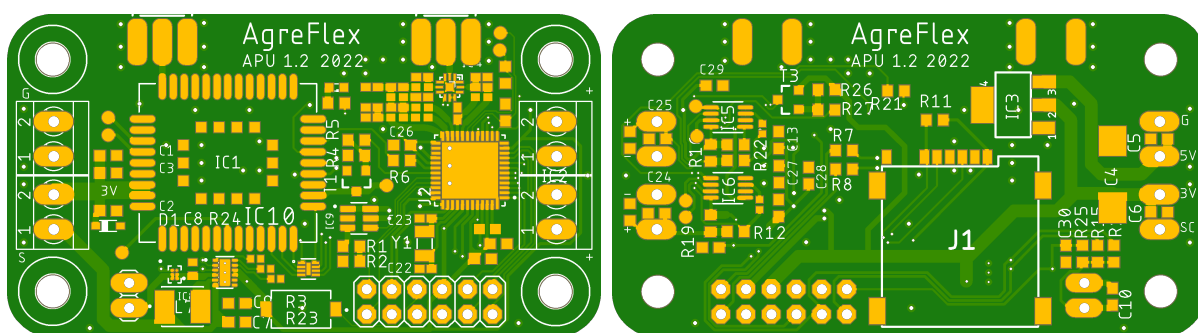
(a) Horní strana

(b) Spodní strana

Obrázek 2.4: Návrh desky plošného spoje APU 1.1

### 2.3.4 Verze 1.2

Ve verzi 1.2 jsem upravil část s měničem, jelikož jsem v předchozí verzi použil špatné pouzdro. Této verze jsem vyrobil pouze jeden zkušební prototyp, který jsem zapájel ručně.



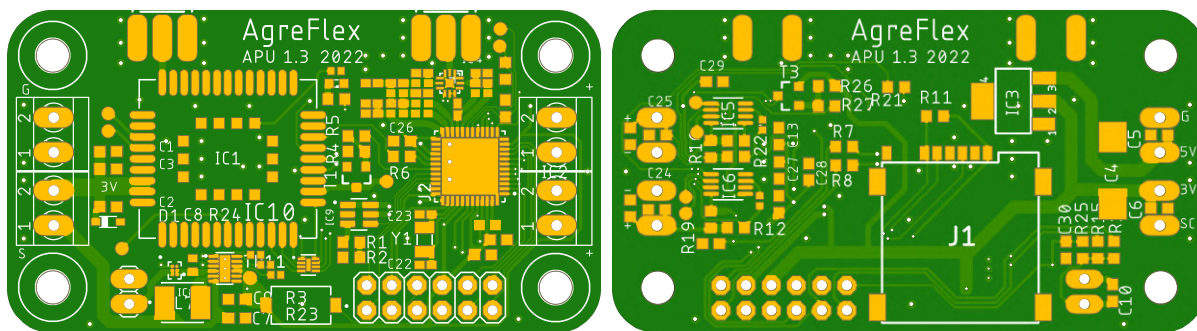
(a) Horní strana

(b) Spodní strana

Obrázek 2.5: Návrh desky plošného spoje APU 1.2

### 2.3.5 Verze 1.3

Ve verzi 1.3 jsem opravil poslední nesrovnalosti z nově přidávaných komponentů ve verzi 1.2, díky čemuž se APU 1.3 stala první produkční verzí a bylo jí vyrobeno sériově 50 ks.



(a) Horní strana

(b) Spodní strana

Obrázek 2.6: Návrh desky plošného spoje APU 1.3

### 2.3.6 Verze 2.0

Mezi všemi verzemi APU byly změny mezi 1.3 a 2.0 historicky největší.

#### Antény a RF

NB-IoT anténu jsem umístil na kratší stranu desky plošného spoje pro vyšší výkon. Dále je na nejvyšší možné pozici a také není stíněná baterií do některých směrů. Dále jsem přidal součástky určené k RF doladění pro případ, že bychom chtěli nechat APU změřit profesionální laboratoří.

Jako anténu pro LoRa jsem zvolil místo klasické SMA pouze pájitelnou anténu přímo do plošného spoje, aby nebylo potřeba mít dva SMA konektory s anténami, což by narušovalo estetický vzhled krabičky. Zároveň jsem zde ponechal prostor pro případné budoucí sloučení antén do jedné – jelikož anténa pro NB-IoT má velmi dobré vlastnosti pro pásmo okolo 868 MHz, často využívané LoRa zařízeními. Dále jsem také vybral úspornější RF prepínač.

#### Nápisy

Po odstranění vrchního krytu krabičky je nyní jako první vidět logo AgreFlexu (na vnější straně desky plošného spoje). Pro sériové číslo APU jsem vyhradil speciální bílý štítek pro pohodlné a kontrastní zapsání informace.

#### Vstupy

Přidal jsem třetí vstup, který je připraven pro testy s komunikačním rozhraní P1 nebo jiným dalším zákaznickým rozhraním, případně i pro komunikaci s optočlenem v elektroměru. Jeho hlavní funkce je ale napojení na rozhraní HDO – dokáže zaznamenávat informaci, zda je aktuálně sepnutý vysoký nebo nízký tarif.

## Konektory

Konektory jsem umístil na stranu krabičky, kde se nachází otvory. Nyní je tak vyvedení kabelů velmi jednoduché (oproti předešlé verzi nepřekáží).

Změnil jsem microSIM konektor z původního dražšího na levnější a zároveň kvalitnější. Přidal jsem také podporu na chip SIM – při výrobě je nyní možné zapájet jakoukoli z těchto dvou možností.

Odebral jsem původní dupontový programovací konektor a nahradil jsem jej praktičtějším TagConnectem. V této verzi tak stačí jen jednoduše připojit kabel se zapojeným programátorem. Tímto jsem zrychlil programovací sekvenci z několika minut na jednotku na pouhých několik sekund.

## Další

Vyměnil jsem původní tlačítko pro detekci otevření krabičky za tlačítko přesahující z desky plošného spoje. Díky tomu je tak proti předchozím verzím velmi jednoduché implementovat funkčnost tohoto prvku. Jelikož mi na druhé straně DPS zbylo místo navíc, umístil jsem zde druhé tlačítko – je proto možné zapojit dva spínače paralelně a pojistit tak situaci, když by jeden přestal fungovat.

Šířka DPS je o 1.6 mm menší, díky čemuž se lépe zasouvá do krabičky. Dále jsem díky tomu mohl zmenšit krabičku o 1 mm.

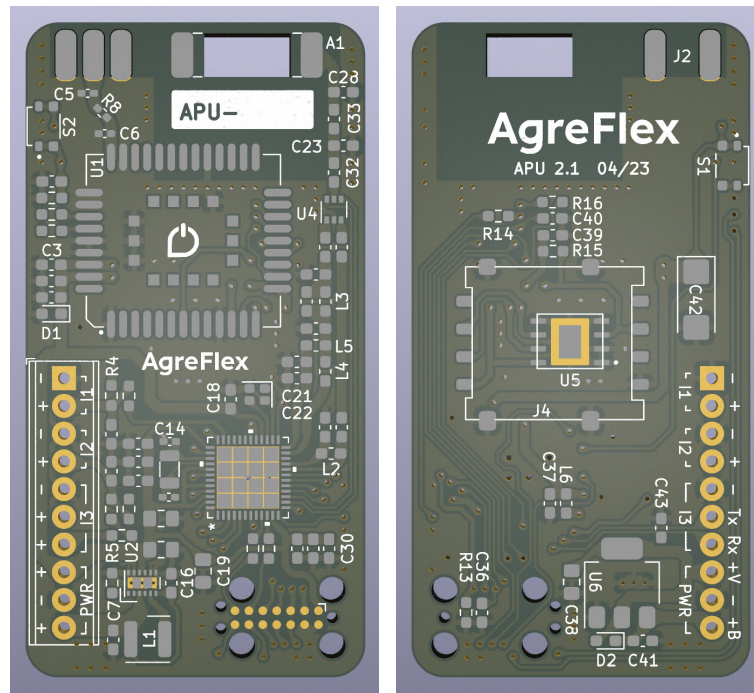
Také jsem implementoval zapojení step-up měniče tak, aby bylo možné vyčerpát baterii až do 0.7 V (místo původních 2.2 V).

### 2.3.7 Verze 2.1

V této verzi jsem opravil chybějící kondenzátor na vstupu I3. Tento kondenzátor je důležitý pro robustní čtení dat – v případě nepřítomnosti by se mohlo občas naindukovat parazitní napětí, které by mohlo být mikrokontrolérem špatně vyhodnoceno.

Dále jsem na programovacím konektoru vyměnil jeden 3.3V pin za GND pin – v praxi se ukázalo, že daleko častěji využiji dva GND piny oproti dvěma 3.3V pinům (například při zapojení programátoru a UART konvertoru).

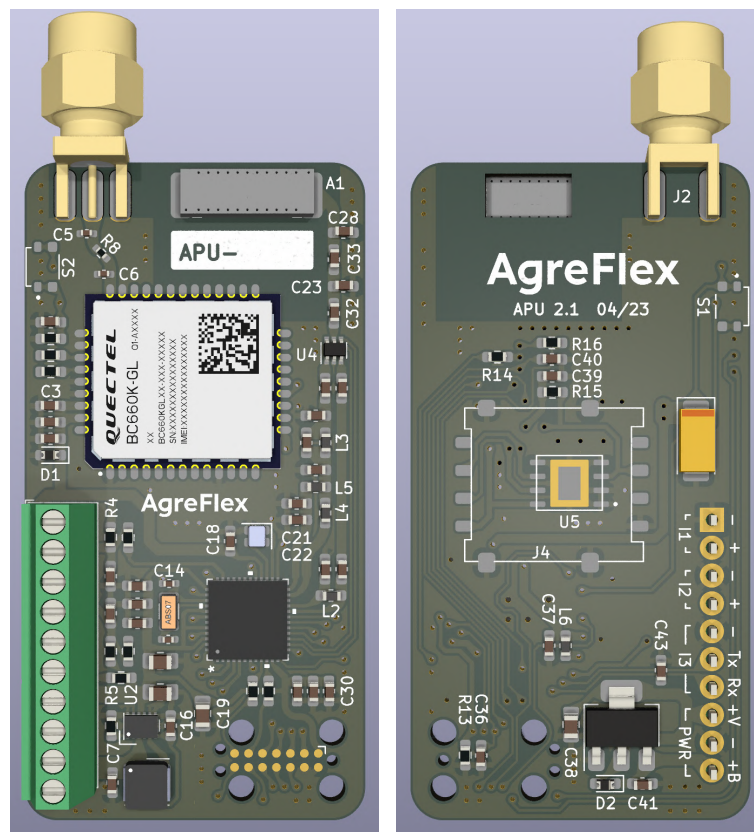
Finálně jsem opravil několik menších chyb z minulé verze (například nevhodnou pozici tlačítek), optimalizoval jsem a opravil některé tloušťky RF cest tak, aby byla jejich impedance 50  $\Omega$ , a společně s tím jsem vyměnil některá pouzdra RCL součástek za menší velikost (konkrétně 0402). Také jsem vycentroval SMA konektor tak, aby byla jeho vzdálenost stejná od obou hran krabičky.



(a) Horní strana

(b) Spodní strana

Obrázek 2.7: Návrh desky plošného spoje APU 2.1



(a) Horní strana

(b) Spodní strana

Obrázek 2.8: Vizualizace desky plošného spoje APU 2.1

## 2.4 Návrh obalu zařízení

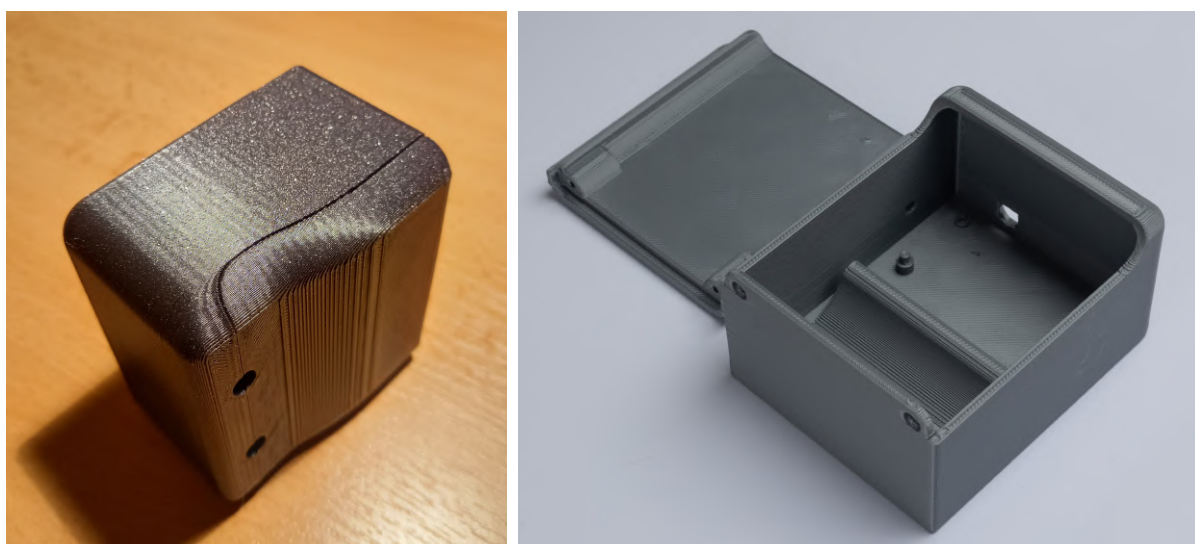
Na prvních prototypu obalu zařízení jsem pracoval společně s mým kolegou. Navrhli jsme krabičky pro všechny prototypové verze APU (1.0, 1.1, 1.2).



Obrázek 2.9: Ukázka výtisku prototypu krabičky pro APU 1.0

### 2.4.1 Obal zařízení od designéra

Po několika pokusech, kdy jsme vždy navrhli klasické kvádrovité a designově neoriginální krabičky s příslušným víkem, jsme se shodli, že bychom pro náš finální produkt rádi měli originálnější obal. Z tohoto důvodu jsme zadali vytvoření obalu zařízení profesionálnímu designérovi, který nám vytvořil méně tradiční design, jenž se nám líbil.



(a) Prvotní verze

(b) Upravená verze pro tisk

Obrázek 2.10: Ukázka výtisků obalu zařízení navrženého designérem

Avšak hned po prvních výtiscích tohoto designu krabičky jsme zjistili několik problémů.

Tisk jedné krabičky trval přes 4 hodiny, což při tisku několika krabiček zároveň způsobovalo velké problémy s odlepováním filamentu v rozích krabiček.





Obrázek 2.11: Ukázka odlepování v rozích krabiček (tzv. *warping*)

Dále bylo nutné tisknout víko s podpěrami (kvůli přítomnosti grafických prvků), což způsobovalo zbytečný odpad navíc. Tělo krabičky také obsahovalo místa, kde by bylo vhodné dát podpěry; jelikož se jednalo o místa uvnitř, nebylo je možné vytvořit, a proto z důvodu variability tisku mostů bylo skládání některých krabiček velmi obtížné.

Finálně bylo téměř nemožné vytisknout na viditelnou stranu logo firmy z důvodu nerovného povrchu. Krabičku jsme proto mírně upravili tak, aby byla více tisknutelná. Několik problémů však zůstalo nevyřešených (například upevnění baterie jsme museli vyřešit oboustrannou lepicí páskou).

## 2.4.2 Vlastní návrh obalu zařízení

Zmíněné problémy ale nebyly jediné nedostatky tohoto návrhu. Během tohoto období jsem při další rešerši zjistil, že ve stacionárních aplikacích je žádoucí mít  $LiSOCl_2$  baterie upevněné pouze v jedné ze dvou vertikálních poloh. Horizontální poloha totiž způsobuje ztrátu kapacity o vyšší jednotky až nižší desítky procent a nesprávná vertikální poloha tuto ztrátu ještě více prohlubuje. Dále také byla velká část krabičky nevyužitá, což mi připadalo jako zbytečné plýtvání plastem.

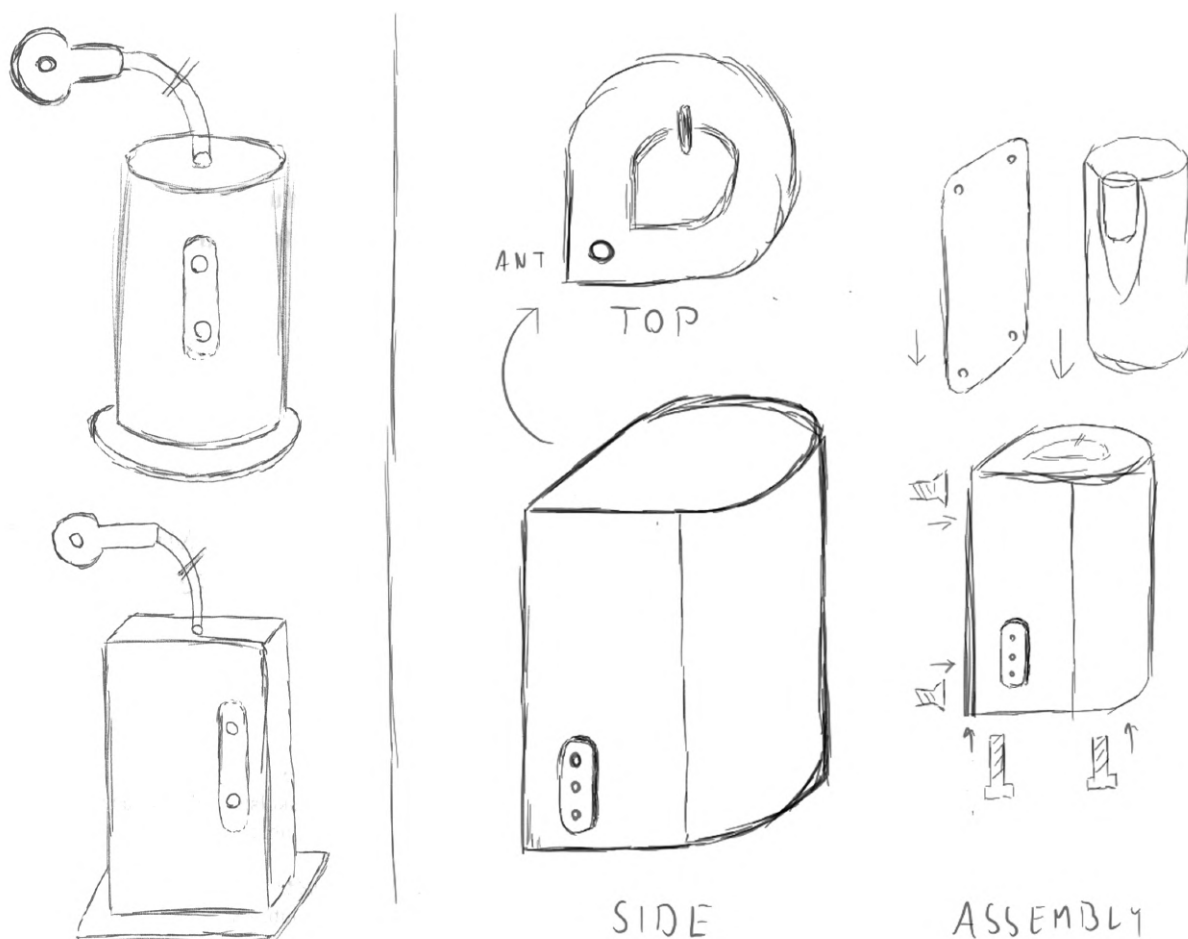
Tudíž jsem se rozhodl připravit vlastní návrh krabičky; stanovil jsem si několik cílů – chtěl jsem vytvořit krabičku, která by:

- Byla **kompaktní**, tudíž **ekologická**.
- Byla svým **designem unikátní**. Chtěl jsem využít trendu inspirovaného od designerů z nejúspěšnějších firem na světě. Jedná se o automatické rozpoznání produktu dle unikátnosti designu – například produkty od společnosti CocaCola lze rozpoznat z pouhého tvaru lahví nebo Mac Pro od společnosti Apple lze identifikovat za pomoci „struhadlového“ provedení předního panelu.
- Využila stejné velikosti DPS a baterie.

- Měla baterii ve správné vertikální poloze.

## Prvotní návrhy

Dlouho jsem přemýšlel nad tím, jak bych mohl takový návrh vytvořit. Po několika náčrtech (některé jsou na obrázku 2.12 vlevo), které se mi vzhledově nelíbily, se mi ale povedlo přijít s návrhem, jenž byl oproti předchozím odlišný (viz obrázek 2.12 vpravo).



Obrázek 2.12: Pilotní návrhy designu obalu zařízení

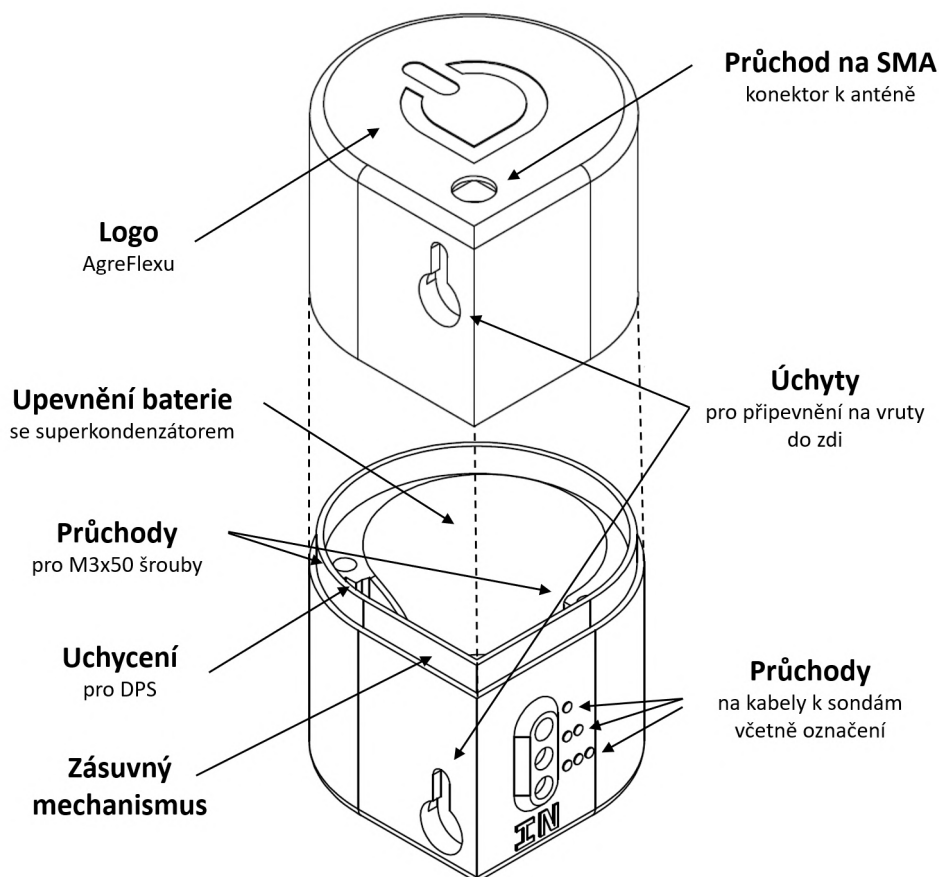
Vytvořil jsem tedy návrh, který koresponduje s logotypem společnosti AgreFlex a připomíná jeho část. Zároveň implementuje baterii ve správné vertikální pozici a opačnému postavení zabraňuje umístěním antény na druhé ze stabilních ploch krabičky.



Obrázek 2.13: Část loga společnosti AgreFlex

## Vytvoření modelu

Jakmile jsem měl hrubou koncepci krabičky, začal jsem navrhovat model v programu Solidworks 2021. Rozhodl jsem se rozdělit obal na dvě stejně vysoké části, aby bylo jednoduché složit celé zařízení dohromady a aby byly tiskové parametry homogenní pro všechny tisknuté kusy. Zásuvný mechanismus spojuje krabičku dostatečně velkou silou; uzavření krabičky je ale možné pojistit dvěma M3x50 šrouby, které ji uchytí pevně. V případě nevyužití je možné tyto otvory pro spojovací materiál využít jako otvor pro odvod zkondenzované vody uvnitř krabičky (ve spodní části krabičky je šachta pro šroub spojená s vnitřním prostorem krabičky).



Obrázek 2.14: Návrh krabičky z programu Solidworks

Baterie zabírá většinu objemu obalu zařízení a je uchycena vnitřní částí krabičky, která je vytisknutá přesně ve tvaru baterie. Deska plošného spoje je umístěná těsně vedle baterie a opět je upevněná prvky krabičky.

Krabičku jsem vytvořil dva úchyty pro upevnění na zeď. Uplatnění těchto otvorů je zejména u podružných elektroměrů, které jsou oproti těm od distributorů méně standardizované a občas tak nejsou umístěné v samostatné rozvodové skříni, nýbrž jsou pouze ve zdi.

Pro sondy jsem vytvořil průchody, jejichž okolí je speciálně prodloužené tak, aby třecí

síla byla co největší a kabely nebylo možné jednoduše vytrhnout. Jednotlivé kabely jsem indexoval za pomoci hmatově citelných teček signalizujících číslo vstupu.

Anténa je umístěna na nejvyšším možném místě krabičky, tudíž není stíněná z jakékoli strany baterií a má nejvyšší možný zisk.

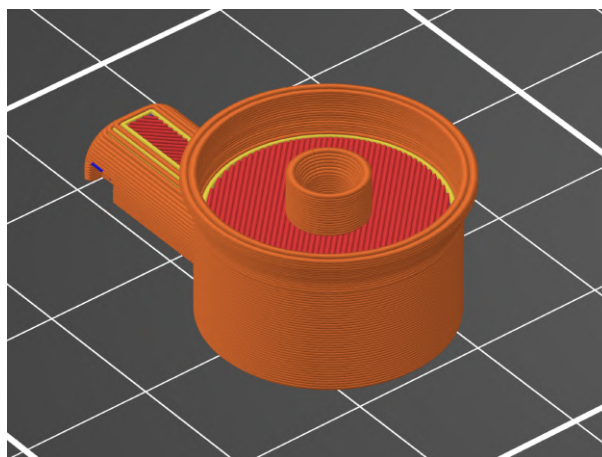
### Porovnání předchozího a současného obalu zařízení

Parametr	Obal od designéra	Můj obal
Rozměry obalu (DxŠxV)	88x72x49 mm	47x47x65 mm
Hmotnost obalu	75 g	36 g
Délka tisku	4 h	2 h
Nutnost tisku s podpěrami	ano	ne
Uchycení baterie krabičkou	ne	ano
Baterie ve vertikální pozici	ne	ano
Počet současně tisknutých krabiček <sup>4</sup>	max. 4.5 ks <sup>5</sup>	max. 10 ks

Tabulka 2.7: Porovnání obalů zařízení

## 2.5 Návrh sondy pro rozhraní metrologické diody

Jelikož hlavní odečítací prvek je metrologická dioda, vytvořil jsem konstrukci, která co nejvíce zjednoduší uchycování na elektroměr (viz kapitola 3.1). Navrhl jsem sondu integrující magnet, jenž pevně přichytí sondu k elektroměru na feromagnetickou podložku.



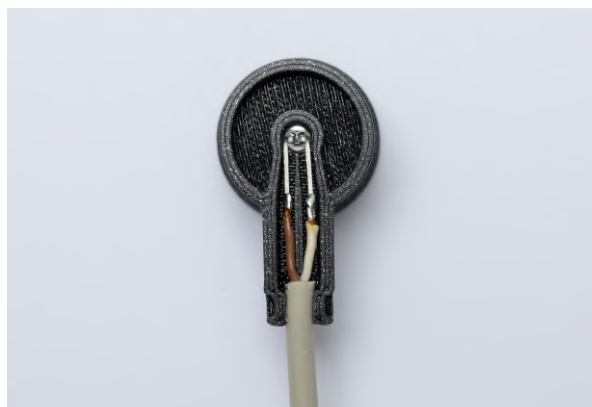
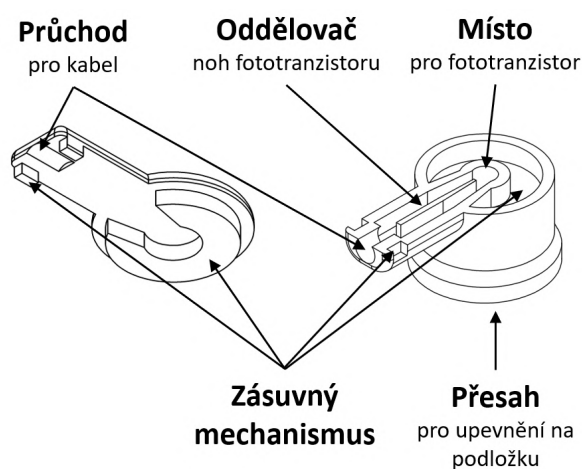
Obrázek 2.15: Řez sondou – ukázka prostoru pro magnet

Aby byl kontakt ještě pevnější, navrhl jsem speciální přesah na konci sondy v rozměrech kovového disku, na který se sonda připevňuje. Díky tomu je sonda jednoduchá na montáž i demontáž a zároveň je fixně upevněna a bez zásahu za žádných okolností sama nespadne.

<sup>4</sup>Na standardní tiskové ploše tiskárny Průša MK3S+

<sup>5</sup>Na tiskovou plochu se vlezou čtyři celé sety krabiček a poté jen krabička či víko

Ve středu sondy se nachází fototranzistor, který je namířený přímo na metrologickou diodu a reaguje tak na její bliknutí. Uvnitř sondy je dále místo pro připájení kabelu k fototranzistoru.

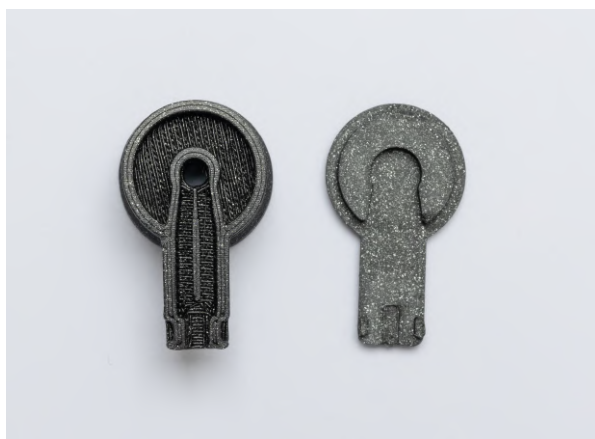


(a) Návrh sondy z programu Solidworks

(b) Umístěný a připájený fototranzistor

Obrázek 2.16: Ukázka rozložené sondy

Pro sondu jsem opět vytvořil zásuvný mechanismus, aby byla sériová produkce co nejjednodušší (nebyla časově a i ekonomicky náročná z důvodu vkládání dalších spojovacích prvků).



(a) Vnitřní strany



(b) Vnější strany

Obrázek 2.17: Ukázka rozložené sondy

Na víčko sondy jsem opět umístil logotyp společnosti a dále jsem pro lepší vzhled v Průšasliceru aktivoval „ironing“ pro vytvoření dokonale hladkých horních ploch.

## 2.6 Tisk

Veškeré díly tisknu na 3D tiskárně Průša MK3S+. Experimentoval jsem s několika barvami filamentů, z estetických důvodů jsem ale nakonec jako hlavní zvolil refill Průšament Galaxy Black a ekologický recyklovaný filament tmavozelené barvy.

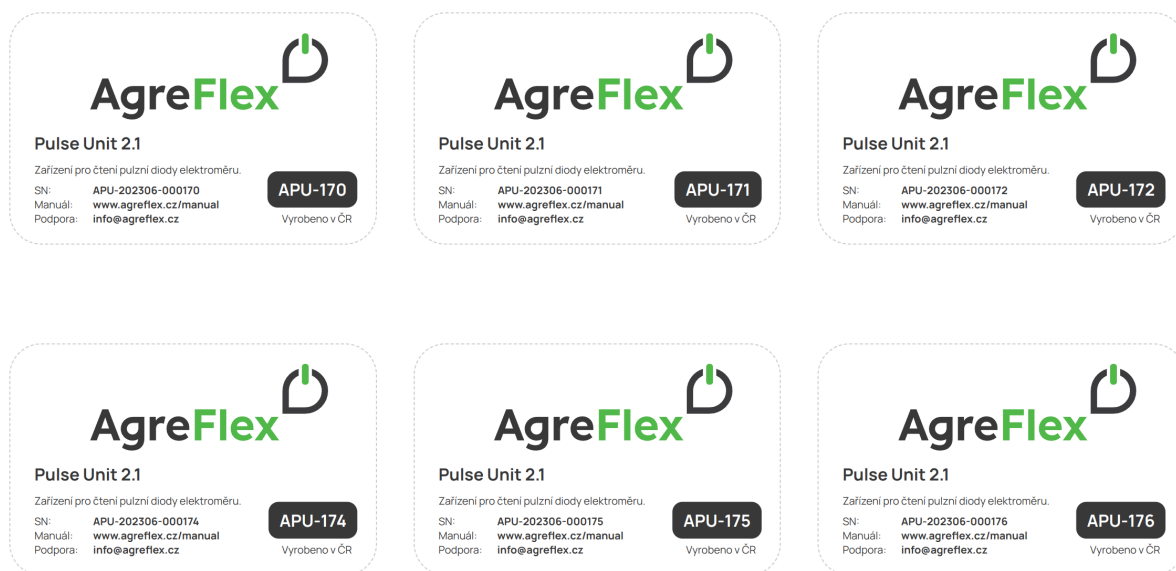
## 2.7 Návrh etikety

Pro zařízení APU jsem navrhl také etiketu za pomoci webových technologií (HTML, CSS) a frameworku Flask se šablonovým manažerem Jinja2. Vytvořil jsem modul, který dle příslušného GET požadavku automaticky vytvoří etikety v příslušném rozsahu sériových čísel.

Za pomoci CSS jsem následně optimalizoval zobrazení pro tisk v reálných rozměrech, stačí proto po zadání požadavku ve webovém prohlížeči zadat požadavek na tisk a vše se automaticky připraví.

Jako první jsem vytvořil klasickou etiketu ve formátu obdélníku se zaoblenými rohy. Umístění etikety uprostřed výrobku také zajistilo nutnost rozřezání v případě otevření výrobku, což slouží jako nevratná signalizace o otevření krabičky.

Na etiketě je možné si všimnout sériového čísla, které se skládá z data výroby DPS a pořadového čísla.



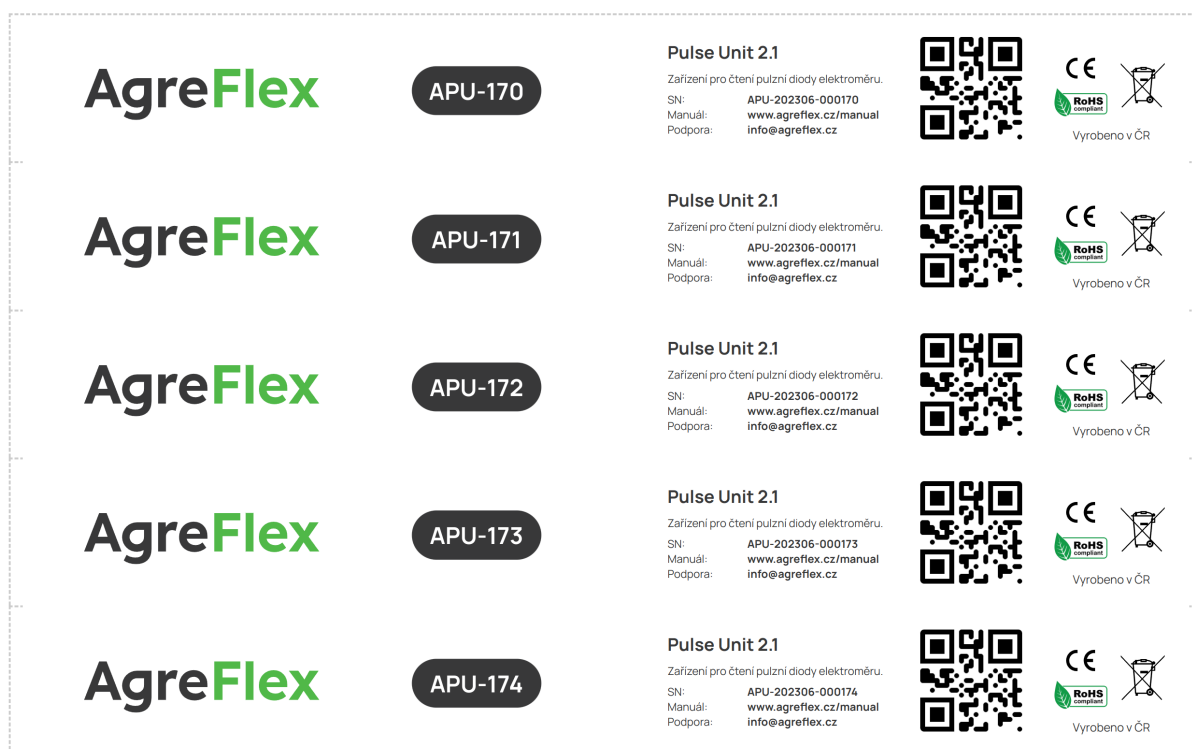
Obrázek 2.18: Ukázka předchozí verze etikety

Zaoblené rohy však způsobily zdlouhavé střihání etiket při sériové výrobě. Jelikož byla nalepená na zaoblené části krabičky, při tisku na papír s méně lepkovou samolepkou se po čase začala odlepovat.

Z těchto důvodů jsem navrhl novou verzi etikety, kde jsem všechny jednotlivé nedostatky vyřešil. Zároveň mě napadlo pro obal využít celého okraje zařízení (podobně jako je tomu například u PET lahví). Toto řešení umožnilo dále skrýt dělení krabičky na dvě části, kde z důvodu nepřesnosti 3D tiskárny byla občas neestetická mezera o velikosti cca 0.3 mm.

Design etikety jsem navrhl tak, aby co nejlépe využíval horizontálního rozměru. Na etiketu jsem umístil co největším písmem ID jednotky, sériové číslo a dále veškeré údaje vyžadované evropskou směrnicí pro elektronické výrobky. Finálně jsem na štítek umístil QR kód, který směřuje na webový portál zobrazující data z APU.

Aby bylo stříhání jednotlivých etiket z papíru A4 co nejjednodušší, do návrhu jsem také přidal tečkovanou čarou úsečky naznačující místo rozstříhnutí. Na vnitřních rozděleních jsem se vyhnul zobrazení celé tečkované čáry z toho důvodu, aby v případě nepřesného stříhání nebyla tato část viditelná na některé z etiket.



Obrázek 2.19: Ukázka nové verze etikety

## 2.8 Optimalizace a sériová výroba

Aby bylo možné jednotku APU vyrábět sériově, mezi jednotlivými verzemi obalu, desky plošného spoje a štítku zařízení jsem musel upravit několik vlastností.

Při programování APU 1.3 jsem zjistil, že dupontové konektory jsou velmi nepraktické pro sériovou výrobu. Proto jsem provedl rešerši na programovací konektory pro sériovou výrobu. Jako vhodný konektor se ukázal TC2070 [49] od firmy Tag-Connect. Na tomto

konektoru je skvělé, že část konektoru na DPS sestává pouze z dřev a měděných ploch. Díky tomu se velmi šetří náklady na výrobu. Pro programování tak pouze stačí dokoupit od výrobce protikus, který se na DPS pevně nacvakne během několika vteřin.

Při výrobě sond se mi osvědčil manufakturní způsob výroby – jednotlivé kroky jsem prováděl vždy po dávkách:

1. Nastříhat požadovaný počet dvojžilových kabelů o délce 1 m.
2. Odstranit z obou konců kabelu alespoň 1-2 cm vnější bužírky.
3. Odstranit z obou žil kabelu cca 0.3 cm bužírky.
4. Ponořit vodiče do roztavené kalafuny.
5. Pocínovat vodiče.
6. Připravit fototranzistor (ohnout vývody o 90°) a připájet vodiče z kabelu k fototranzistoru a k desce plošného spoje.

Při tvorbě předchozí verze štítků jsem zjistil, že je velmi nepraktické ručně vystřihávat zaoblený tvar etikety, proto jsem navrhl novou verzi, kterou je možné stříhat přímo na řezačce na papír.

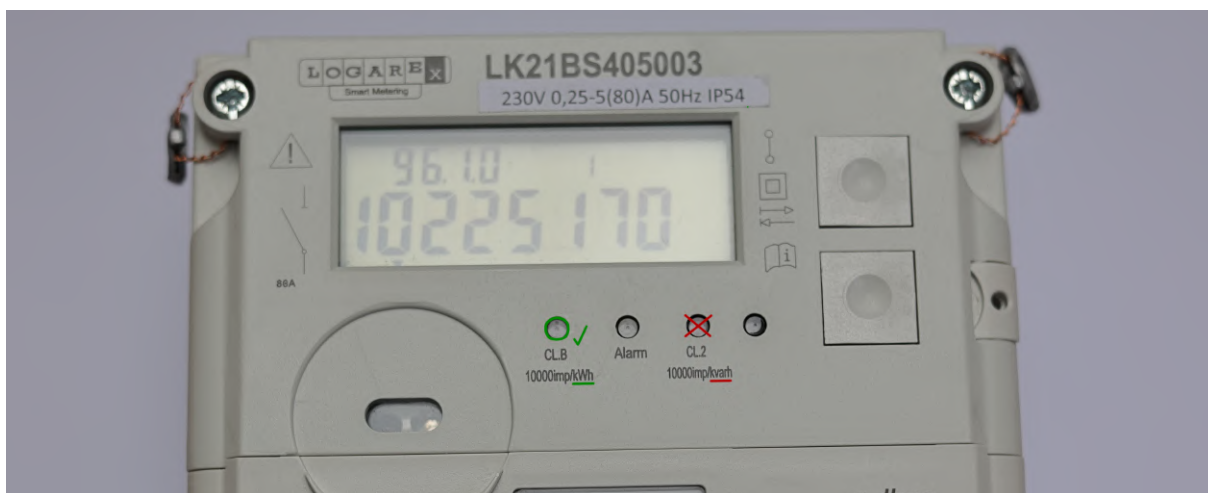
Při tisku obalů zařízení na tiskárně Průša MK3S+ se mi osvědčilo najednou tisknout nižší počet krabiček (6 ks) umístěných uprostřed. Při využití celého prostoru tiskového plátu pro 10 ks obalů se mi často stávalo, že hranatá část podstav krabiček umístěných na okrajích se začala odlepovat z tiskového plátu.



## 3. Pohled uživatele

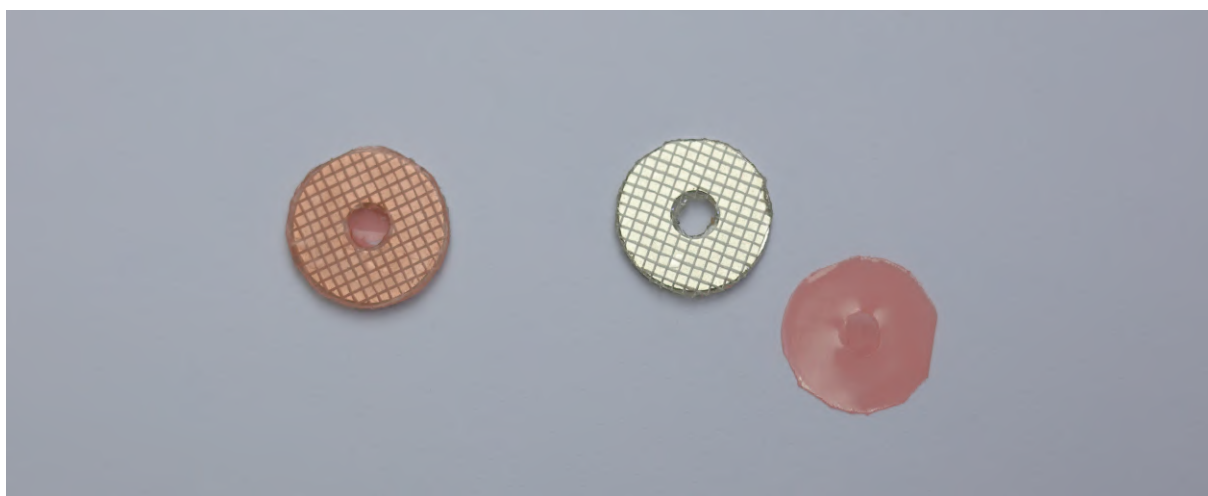
### 3.1 Instalace zařízení

Instalace zařízení je velmi jednoduchá. Na elektroměru stačí najít diodu, u které je nápis podobný „imp./kWh“. Některé elektroměry mají komunikační rozhraní i pro signalizaci jalové spotřeby, je proto důležité dát si pozor a nespřést si nápis „imp./kWh“ s nápisem „imp./kvarh“.



Obrázek 3.1: Krok 1 – nalezení metrologické diody s koeficientem imp./kWh

Po nalezení správné diody stačí vzít feromagnetický disk přibalený k APU, odstranit z něj plastovou fólii a následně disk nalepit na metrologickou diodu elektroměru.



Obrázek 3.2: Krok 2a – odstranění plastové fólie ze samolepicí podložky disku



Obrázek 3.3: Krok 2b – nalepený feromagnetický disk na elektroměru

Finálně stačí již jen umístit APU do rozvodové/elektroměrové skříně a následně vzít sondu z APU a umístit ji na feromagnetický disk.



Obrázek 3.4: Krok 3a – upevnění sondy APU na disk na metrologické diodě



Obrázek 3.5: Krok 3b – sonda zapojená na rozhraní elektroměru s metrologickou diodou

## 3.2 Grafické materiály

Pro APU jsem také vytvořil veškeré grafické materiály. Jelikož nedisponuji profesionálním produktovým fotostudiem s bílým pozadím a ani žádným profesionálním osvětlením, vyrobil jsem si své pozadí ze dvou slepených kartonů, které jsem pokryl několika bílými kancelářskými papíry.

Výslednou kompozici jsem zachytil bezzrcadlovkou Canon EOS R8. Jednotlivé fotografie jsem následně světelně a barevně upravil v programu Canon Digital Photo Professional a pozadí jsem vyretušoval v programu Gimp.



Obrázek 3.6: Fotografie finální a složené APU 2.1

## 4. Analýzy zařízení

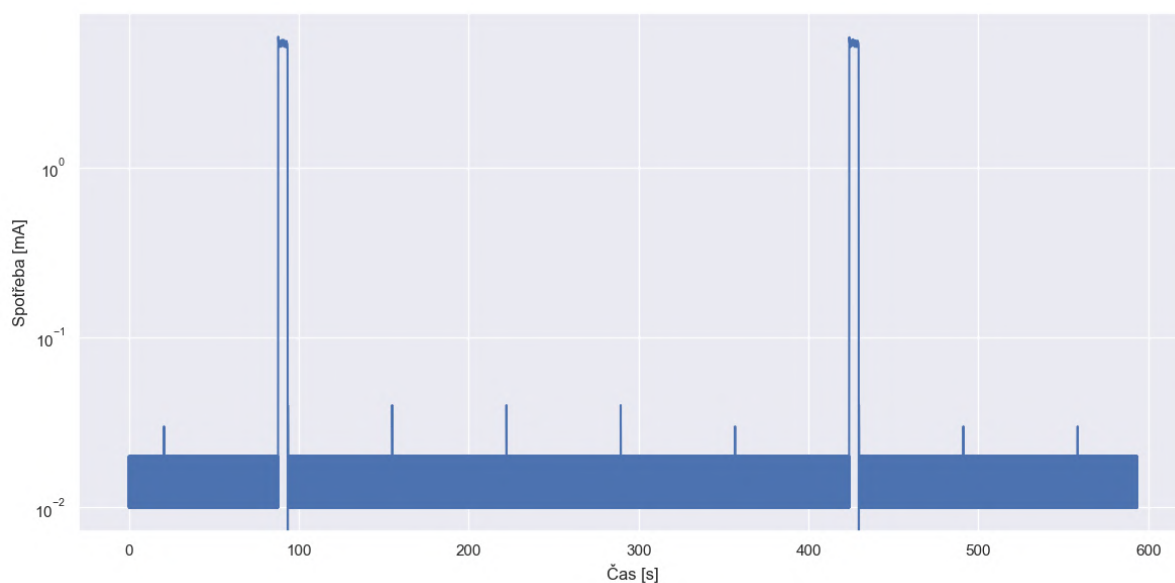
### 4.1 Měření spotřeby zařízení

Abych dokázal vyhodnotit, které optimalizace snížily spotřebu energie, musel jsem nejprve přijít s technickým řešením pro měření odběru proudu zařízení.

Měl jsem k dispozici vlastní měřicí multimetr UNI-T UT50D a osciloskop Hantek DSO5202P s pamětí pro záznam 40 KiB. Jelikož můj multimetr nedisponuje rozhraním pro ukládání naměřených dat a perioda odesílání dat do cloudového systému je příliš vysoká na to, aby osciloskop zvládl nahrát celé měření, musel jsem přijít s alternativní variantou měření.

#### 4.1.1 Měření na Univerzitě Palackého

Kontaktoval jsem proto Mgr. Michala Dudku z Katedry optiky Univerzity Palackého v Olomouci, který měl k dispozici multimetr s ukládáním dat do formátu CSV při vzorkovací frekvenci  $f_s = 100 \text{ Hz}$ .



Obrázek 4.1: Ukázka naměřených dat z multimetru v logaritmické škále. Na obrázku lze vidět osm cyklů APU pro odečet a dva cykly pro odeslání dat

Po prozkoumání technických parametrů jsem však zjistil dva zásadní nedostatky měření.

1. Multimetr vykazoval šumové pozadí oscilující mezi  $10\text{-}20 \mu\text{A}$ . Z tohoto důvodu nebylo možné potvrdit spotřebu ve spánku, kterou jsem svým ručním multimetrem s nízkou vzorkovací frekvencí změřil na  $4 \mu\text{A}$ .

2. Vzorovací frekvence multimetru byla zřejmě stále nízká, jelikož vůbec nezaznamenal vysokospotřebové píky v řádu stovek  $mA$ , které se měly dle datasheetu při odesílací sekvenci vyskytovat.

Jelikož jsem neměl k dispozici žádná jiná zařízení, rozhodl jsem se hledat jiná řešení.

### 4.1.2 Superkondenzátor jako měřič spotřeby

Spotřeba APU měla být dle mých cílů velmi nízká. Proto jsem přišel s nápadem využít pro měření spotřeby superkondenzátor, který by měl svou kapacitou pokrýt několik odesílacích cyklů. Jelikož bude APU jednotka zapojená pouze na superkondenzátor v izolované soustavě, nedojde tak k úniku spotřeby vlivem například nepřesného či málo častého měření.

Proto jsem vyzkoušel poměrně levné superkondenzátory o kapacitách v jednotkách Faradů. Můj postup měření byl následující:

- Nabil jsem superkondenzátor na jeho maximální možné povolené napětí dle datasheetu (3 V).
- Odpojil jsem superkondenzátor od zdroje napětí a chvíli jsem vyčkal na ustálení napětí.
- Mezitím jsem odpojil ze zdroje napětí APU ve chvíli, kdy byla v režimu spánku, aby se mi do měření nezapočítala i jednorázová velká spotřeba při inicializaci zařízení. V této fázi APU spotřebovává nejmenší proud a dokáže proto při přepojování trvajícím několik sekund bezproblémově vydržet na svých blokových kondenzátorech<sup>1</sup>.
- Připojil jsem APU a následně jsem změřil počáteční napětí na superkondenzátoru. Jakmile APU dokončila odesílací cyklus, znovu jsem změřil napětí  $U_z$  na superkondenzátoru a údaj si uložil do tabulky.

Jelikož na některých superkondenzátorech byla rychlost samovybíjení velmi vysoká, musel jsem z důvodu odečtení chyby několikrát změřit napětí  $U_b$  bez připojení zátěže. Tyto hodnoty jsem odečítal po stejných intervalech, jako při měření se zapojenou zátěží. Výslednou diferenci napětí bez chyby jsem poté vypočítal jako:

$$\Delta U = \Delta U_z - \Delta U_b$$

Rovnice 4.1: Výpočet skutečné difference napětí  $\Delta U$

Skutečnou spotřebu jsem získal dosazením do vztahu:

---

<sup>1</sup>Dle mých testů dokáže APU vydržet na svých blokových kondenzátorech bez restartování a se zachováním dat cca 40 s

$$I_{APU} = \Delta U \frac{C}{\Delta t},$$

Rovnice 4.2: Výpočet spotřeby APU na základě úbytku napětí na superkondenzátoru

kde  $C$  je kapacita superkondenzátoru a  $\Delta t$  je doba, za kterou byl pozorován úbytek  $\Delta U$  – v mém případě se jedná o časovou periodu odesílání dat.

Cyklus	$U_z$ [V]	$U_b$ [V]	$\Delta U_z$ [V]	$\Delta U_b$ [V]	$\Delta U$ [V]	$I_{APU}$ [mA]
0	2.98	2.97	-	-	-	-
1	2.89	2.93	0.09	0.04	0.05	0.83
2	2.79	2.90	0.10	0.03	0.07	1.17
3	2.70	2.88	0.09	0.02	0.07	1.17
4	2.61	2.86	0.09	0.02	0.07	1.17
5	2.52	2.84	0.09	0.02	0.07	1.17
6	2.43	2.82	0.09	0.02	0.07	1.17
7	2.33	2.80	0.10	0.02	0.08	1.33
8	2.21	2.78	0.12	0.02	0.10	1.67

Tabulka 4.1: První měření na superkondenzátoru s energeticky neoptimalizovanou APU. Byl použit kondenzátor o kapacitě  $C = 5 F$  a perioda měření  $\Delta t = 5 min$

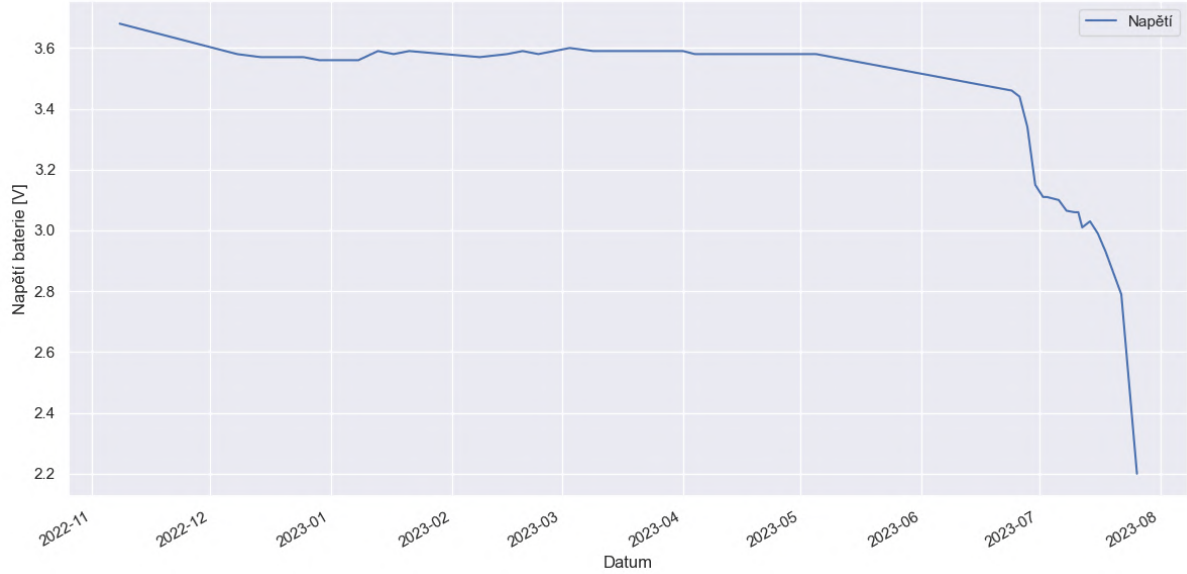
## 4.2 Experiment pro predikci výdrže baterie

Poté, co jsem vyladil a implementoval nejdůležitější optimalizace pro snížení spotřeby, spustil jsem 8. 11. 2022 experiment pro predikci výdrže na baterii v dlouhodobém časovém horizontu. Experiment jsem naplánoval pro zimní období, kdy je z baterie energie dodávána s nejmenší účinností. Takto testovanou APU jednotku jsem navíc umístil do lokality s mírně podprůměrnou kvalitou signálu a připojil jsem ji na metrologickou diodu elektroměru.

Standardně používanou baterii s kapacitou 19-20 Ah jsem nahradil nejmenší baterií, kterou jsem našel na trhu, se stejnými parametry jako má originální baterie, abych následně mohl výsledky extrapolovat. Zvolil jsem baterii ER14250H [50], která je od stejného výrobce a je zhotovena stejnou metodou výroby včetně použití stejného chemického média, nominálního napětí, ...Liší se pouze v kapacitě, která činí  $Q_{mb} = 1.2 Ah$ .

Při začátku experimentu jsem neměl ještě plně vyvinutý firmware. Z tohoto důvodu jsem musel napětí na baterii měřit ručně s multimetrem a jednotlivé hodnoty následně zaznamenávat do tabulky. Frekvenci odečítání jsem zvýšil hlavně v konečné fázi životnosti zařízení, když začalo napětí na baterii poklesávat.

Experiment skončil 26. 7. 2023, kdy napětí na baterii pokleslo pod minimální možné napájecí napětí NB-IoT čipu BC660K. Zařízení tak fungovalo 260 dní.



Obrázek 4.2: Napětí baterie ER14250H na čase s připojenou APU 1.3

## 4.2.1 Predikce výdrže baterie

Predikci výdrže je možné spočítat jako:

$$t_{vb} = t_{mb} \frac{Q_{vb}(t_{vb})}{Q_{mb} + Q_s},$$

Rovnice 4.3: Predikce výdrže baterie

kde  $t_{vb}$  je čas výdrže velké baterie ER34615H ve dnech,  $t_{mb}$  je čas výdrže malé baterie z experimentu ve dnech,  $Q_{vb}(t_{vb})$  je kapacita velké baterie závislá na čase z důvodu implementace efektu samovybíjení,  $Q_{mb}$  je kapacita malé baterie a  $Q_s$  je kapacita paralelně připojeného superkondenzátoru.

Kapacitu velké baterie  $Q_{vb}(t_{vb})$  lze poté vypočítat následovně:

$$Q_{vb}(t_{vb}) = (1 - s_b)^{t_{vb}/365.25},$$

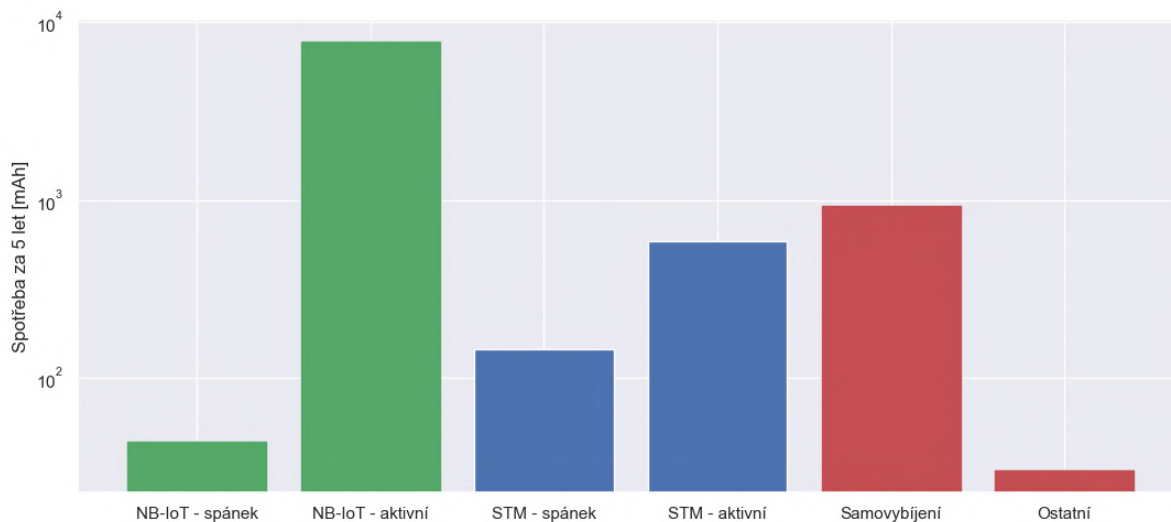
Rovnice 4.4: Predikovaná kapacita baterie v závislosti na době životnosti

kde  $s_b$  je samovybíjení velké baterie a je rovno 1 %.

Jelikož je ve výpočtu  $t_{vb}$  jedna z hodnot závislá na této hodnotě, vypočítal jsem její konečnou hodnotu za pomoci iteračního optimalizačního algoritmu na  $t_{vb} = 9.55$  let.

Finální model predikce výdrže baterie zahrnuje veškeré jevy, které by mohly výdrž zařízení

na baterii snížit. Zároveň jsem z konečného odhadu preventivně odečetl 5 % – výsledná predikovaná hodnota by proto měla být spodní odhad predikce výdrže na baterii.



Obrázek 4.3: Analýza spotřeby jednotlivých částí APU

## 4.3 Experimenty za ztížených podmínek

APU jsem také testoval za ztížených podmínek.

### 4.3.1 Vysoká teplota

Zjistil jsem, že APU je odolná k vyšším letním teplotám – například okolo 45 °C. Konkrétně vycházím z dat z několika APU jednotek umístěných na přímém slunci v nejteplejších dnech za rok 2023.

### 4.3.2 Nízká teplota

Dále jsem simuloval záporné hodnoty teploty umístěním APU do mrazáku. Zde jsem jednotku ponechal přibližně týden při teplotách cca -18 °C. Jednotka po celou dobu pracovala bezchybně, zpozoroval jsem pouze nepatrné snížení napětí na baterii.

### 4.3.3 Venkovní podmínky

Také jsem APU testoval za nepříznivých podmínek. Například jsem umístil APU na střechu, kde jsem ji přivázal k anténě, abych tak otestoval, co se stane v případě mrazů spojených s deštěm, větrem a sněhem. Tato APU jednotka se bohužel po třech cyklech napadaného a roztátého sněhu odmlčela – zřejmě z důvodu vody uvnitř krabičky. Experiment jsem ale na střechě ponechal a jednotka se po příchodu teplých měsíců opět probudila. V současné době znovu odesílá data.



# Závěr

Ve své práci jsem se věnoval výzkumu a vývoji nového zařízení, které do té doby neexistovalo. Na začátku vývoje jsem analyzoval stávající řešení a identifikoval jejich klíčové nedostatky – výdrž na baterii a periodu odesílání dat do cloudu. Tyto nedostatky jsem vyřešil na svém zařízení, které jsem, podle názvu firmy, nazval jako AgreFlex Pulse Unit (APU).

Ve své práci jsem vytvořil schéma a návrh desky plošného spoje, který jsem optimalizoval na celkem čtyřech prototypových verzích, jež jsem pájel manuálně, a poté na dvou sériově vyráběných verzích. Během optimalizace výdrže na baterii jsem překonal několik obtíží – například jsem zvládl vyřešit problém s nedostatečným vybavením za pomoci nakoupení součástek v hodnotě o několik řádu nižší, než je hodnota nového laboratorního vybavení.

Navrhl jsem také obal zařízení v logotypu firmy, u kterého se mi navíc povedlo vymyslet způsob tisku více filamentů na jedné vrstvě pomocí upravení gcodu z Průšasliceru. Při tvorbě jsem kladl důraz na ekologičnost projektu, krabičku jsem proto optimalizoval na užití co nejmenšího množství plastu a jako materiál jsem zvolil ekologické varianty filamentů, případně refilly od společnosti Průša. Finálně jsem vytvořil grafickou prezentaci projektu.

V současné době je v aktivním použití více než 100 jednotek. Většinu z těchto jednotek jsem i vlastnoručně naprogramoval, zapájel, vytiskl pro ně krabičku a nakonec i seskládal. Celkem byly vyrobeny tři sériové dávky o velikostech 50, 100 a 200 ks. APU jednotku jsem společně s kolegy z firmy AgreFlex prezentoval na výstavě For Arch 2023, kde se setkala s velkým úspěchem.

Aktuálně pracuji na dalším zařízení, jež doplní APU. Jedná se o chytrý stykač, který již bude dle pokynů APU spínat jednotlivé vysokopříkonové spotřebiče. V budoucnu mě čeká také například vylepšení etikety o dynamický QR kód nebo implementace automatického vzdáleného aktualizování veškerých zařízení AgreFlexu.

# Diskuze

Bateriový experiment jsem provedl na verzi APU 1.3, nejnovější verze APU 2.1 je proto neotestovaná dlouhodobým výdržovým experimentem. Jelikož jsem ale od verze 1.3 nezměnil schéma klíčových částí, neočekávám, že by se měla spotřeba z nějakého důvodu v realitě zvýšit. Naopak jsem spotřebu energie od tohoto experimentu ještě více snížil; současná výdrž APU 2.1 by tak proto měla být ještě vyšší, než je závěr z experimentu s APU 1.3 (jednotlivé optimalizace jsem opět prováděl za pomoci měření spotřeby na superkondenzátorech).

Při predikci výdrže jsem uvažoval pouze kapacitu velké baterie ER34615H jako závislou na čase (efekt samovybíjení), kapacitu superkondenzátoru a menší baterie ER14250H jsem považoval za konstantní. Ačkoliv bych mohl vytvořit predikci se započítáním jevu na těchto dvou součástkách, myslím si, že je to zbytečné, jelikož oproti době užití velké baterie ER34615H byla menší baterie v provozu méně než 1 rok, což by znamenalo změnu kapacity pouze o méně než 1 %. Navíc tato změna by akorát přispěla k ještě vyšší predikci výdrže velké baterie ER34615H.

APU byla optimalizována zejména pro rozhraní metrologické diody. Avšak při návrhu jsem dbal na to, aby ji v budoucnu bylo možné použít i na další druhy rozhraní – jako například zákaznické rozhraní na nových (a zatím stále neprevalentních) elektroměrech. Existuje ale několik dalších rozhraní, pro které je možné APU využít. Jednotku jsem otestoval například na pulzním rozhraní S0 elektroměrů nebo na magnetickém rozhraní plynometrů. U vodoměrů je rozšíření stále ve fázi rešerše, ale dle prvotních průzkumů by řešení mělo být možné za předpokladu snížení energetické optimality zařízení.

Může se zdát, že jednou z limitací odečítání přes impulzní rozhraní může být granularita a frekvence blikání – v případě vysokých spotřeb elektrické energie maximální možná frekvence blikání (ať už na straně elektroměru, nebo měřícího zařízení) a v případě nízké spotřeby naopak nízká granularita na elektroměrech s nízkým koeficientem přepočtu. Distributoři však používají elektroměry s vysokým přepočítacím koeficientem (nejčastěji se setkávám s  $10\,000 \frac{\text{imp.}}{\text{kWh}}$ ), díky čemuž je granularita vždy vysoká, a v případě vysokých spotřeb přidávají navíc ještě měřící transformátory MTP a MTN, které rozsah elektroměru přeškalují.

Zajímavým přínosem by mohlo být využití RF prepínače, který by přepojoval hlavní anténu mezi NB-IoT čipem a čipem s LoRa modulem. Výhodou tohoto řešení by byla levnější pořizovací cena APU a vyšší zisk pro komunikaci přes LoRa, nevýhodou pak snížený zisk pro NB-IoT čip z důvodu útlumu RF prepínače.

# Seznamy

## Seznam použitých zdrojů

1. SVAZ MODERNÍ ENERGETIKY. *Česko zažívá po 13 letech solární renesanci. I díky našemu příspěvku slaví Evropa rekordní růst fotovoltaiky* [online]. 2023-12. [cit. 2024-03-29]. Dostupné z: <https://www.modernienergetika.cz/aktuality/cesko-zaziva-po-13-letech-solarni-renesanci-i-diky-nasemu-prispevku-slavi-evropa-rekordni-rust-fotovoltaiky/>.
2. NOVÁK, Radek. *Výhled elektromobility v Česku* [online]. [cit. 2024-03-25]. Dostupné z: [https://www.csas.cz/content/dam/cz/csas/www\\_csas\\_cz/Dokumenty-korporat/Dokumenty/Analytici/vyhled\\_elektromobility\\_v\\_CR\\_2019\\_03.pdf](https://www.csas.cz/content/dam/cz/csas/www_csas_cz/Dokumenty-korporat/Dokumenty/Analytici/vyhled_elektromobility_v_CR_2019_03.pdf).
3. EUROENERGY, spol. s r. o. *Aktualizace predikce vývoje elektromobility v ČR do roku 2045* [online]. 2021-12. [cit. 2024-03-28]. Dostupné z: [https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/narodni-akcni-plan-pro-chytre-site/2022/2/Elektromobilita\\_predikce-do-2045.pdf](https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/narodni-akcni-plan-pro-chytre-site/2022/2/Elektromobilita_predikce-do-2045.pdf).
4. KUBÁTOVÁ, Zuzana. *Trh s energiemi zdivočel. Regulace cen ale není dobrý lék, říká manažer ČEPS* [online]. 2022-09. [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: <https://www.seznamzpravy.cz/clanek/ekonomika-byznys-trendy-analyzy-trh-s-energiemi-zdivocel-regulace-cen-ale-neni-dobry-lek-rika-manazer-ceps-211353>.
5. VOKÁL, Vladimír. *Analytik: Evropa byla od blackoutů setiny. Bez ČR by to Rakousko nezvládlo* [online]. 2021-01. [cit. 2024-03-30]. Dostupné z: [https://www.idnes.cz/ekonomika/zahranicni/blackout-cesko-energie-rakousko-jadro-uhli-8-ledna.A210119\\_125527\\_eko-zahranicni\\_vov](https://www.idnes.cz/ekonomika/zahranicni/blackout-cesko-energie-rakousko-jadro-uhli-8-ledna.A210119_125527_eko-zahranicni_vov).
6. AKU-BAT CZ. *ČR po šesti letech stále nemá legislativní úpravu akumulace energie a agregace flexibility* [online]. 2023-10. [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/25885-cr-po-vesti-letech-stale-nema-legislativni-upravu-akumulace-energie-a-agregace-flexibility>.
7. LANDIS+GYR. *Landis+Gyr ZMF100* [online]. 2024. [cit. 2024-04-18]. Dostupné z: <https://www.landisgyr.cz/product/landisgyr-zmf100-acab-2/>.
8. ČESKO. *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010–2024. [cit. 2023-03-25]. § 4 odst. 4 písm. c) vyhlášky č. 359/2020 Sb., o měření elektřiny - znění od 1. 1. 2024. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-359#p4-4-c>.
9. ČESKO. *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010–2024. [cit. 2024-03-25]. § 6 odst. 1 písm. c) vyhlášky č. 359/2020 Sb., o měření elektřiny - znění od 1. 1. 2024. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-359#p6-1-c>.

10. ČESKO. *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010–2024. [cit. 2024-03-25]. § 6 odst. 2 vyhlášky č. 359/2020 Sb., o měření elektřiny - znění od 1. 1. 2024 Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-359#p6-2>.
11. MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. *Projekce flexibility v síti NN a VN související s rozvojem elektromobility a decentrálních zařízení, zejm. stacionární akumulací, v ČR do roku 2040* [online]. 2021-04. [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: [https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/vyzkum-a-vyvoj-v-energetice/resene-dokoncene-projekty-a-jejich-vystupy/projekty-podporene-v-ramci-2-verejne-souteze-programu-theta/2021/8/Vystup-\\_2-2\\_Workshop-Simulace-geografickeho-a-casoveho-rozlozeni-flexibility.pdf](https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/vyzkum-a-vyvoj-v-energetice/resene-dokoncene-projekty-a-jejich-vystupy/projekty-podporene-v-ramci-2-verejne-souteze-programu-theta/2021/8/Vystup-_2-2_Workshop-Simulace-geografickeho-a-casoveho-rozlozeni-flexibility.pdf).
12. ČEZ DISTRIBUCE, a. s. *Připojovací podmínky pro odběrná místa, výrobní elektřiny a lokální distribuční soustavy připojené k distribuční síti nízkého napětí* [online]. 2023-09. [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: <https://www.cezdistribuce.cz/file/edee/distribuce/pripojovacipodminkynn.pdf>.
13. QUECTEL. *BC660K-GL Hardware Design* [online]. 2021-01. [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: [https://www.quectel.com/wp-content/uploads/2021/04/Quectel\\_BC660K-GL\\_Hardware\\_Design\\_V1.0.pdf](https://www.quectel.com/wp-content/uploads/2021/04/Quectel_BC660K-GL_Hardware_Design_V1.0.pdf).
14. KADUSIC, Esad; RULAND, Christoph; HADZAJLIC, Narcisa; ZIVIC, Natasa. The factors for choosing among NB-IoT, LoRaWAN, and Sigfox radio communication technologies for IoT networking. In: *2022 International Conference on Connected Systems amp; Intelligence (CSI)*. IEEE, srpen 2022. Dostupné z DOI: [10.1109/csi54720.2022.9923999](https://doi.org/10.1109/csi54720.2022.9923999).
15. SECTRON. *Přehled sítí pro IoT v Čechách* [online]. [cit. 2024-03-28]. Dostupné z: <https://eshop.sectron.cz/prehled-siti-pro-iot-v-cechach/a-6398/>.
16. SIGFOX. *První celorepublikový mobilní operátor pro internet věcí* [online]. [cit. 2024-03-30]. Dostupné z: <https://sigfox.cz/cs>.
17. IOT PORT. *Objednáváte připojení k IoT síti LoRa* [online]. [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: <https://www.iotport.cz/objednavka-lorawan>.
18. VODAFONE. *Tarify a SIM karty pro IoT zařízení* [online]. 2024. [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: <https://www.vodafone.cz/podnikatele/internet-veci/iot-easy-connect/>.
19. VODAFONE. *Sítě NB-IoT a Cat-M pro efektivnější podnikání* [online]. 2024. [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: <https://www.vodafone.cz/podnikatele/internet-veci/iot-site/>.
20. SORENSEN, Andre; WANG, Hua; REMY, Maxime Jerome; KJETTRUP, Nicolaj; SORENSEN, Rene Brandborg; NIELSEN, Jimmy Jessen; POPOVSKI, Petar; MADUENO, German Corrales. Modeling and Experimental Validation for Battery Lifetime Estimation in NB-IoT and LTE-M. *IEEE Internet of Things Journal*. Červen 2022, roč. 9, č. 12, s. 9804–9819. ISSN 2372-2541. Dostupné z DOI: [10.1109/jiot.2022.3152173](https://doi.org/10.1109/jiot.2022.3152173).

21. SIGFOX. *Sigfox v Česku končí, T-Mobile vypíná vysílače* [online]. 2023-04. [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: <https://www.lupa.cz/aktuality/sigfox-se-v-cesku-odmlcel-zda-je-to-konec-teto-site-internetu-veci-jeji-provozovatele-nekomentuji/>.
22. U-BLOX. *SARA-N3 series* [online]. 2022-09. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: [https://content.u-blox.com/sites/default/files/SARA-N3\\_DataSheet\\_UBX-18066692.pdf](https://content.u-blox.com/sites/default/files/SARA-N3_DataSheet_UBX-18066692.pdf).
23. U-BLOX. *SARA-R5 series* [online]. 2023-10. [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: [https://content.u-blox.com/sites/default/files/SARA-R5\\_DataSheet\\_UBX-19016638.pdf](https://content.u-blox.com/sites/default/files/SARA-R5_DataSheet_UBX-19016638.pdf).
24. U-BLOX. *SARA-R52 series* [online]. 2024-04. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: [https://content.u-blox.com/sites/default/files/documents/SARA-R52\\_DataSheet\\_UBX-22038918.pdf](https://content.u-blox.com/sites/default/files/documents/SARA-R52_DataSheet_UBX-22038918.pdf).
25. U-BLOX. *SARA-R4 series* [online]. 2023-07. [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: [https://content.u-blox.com/sites/default/files/SARA-R4\\_DataSheet\\_UBX-16024152.pdf](https://content.u-blox.com/sites/default/files/SARA-R4_DataSheet_UBX-16024152.pdf).
26. QUECTEL. *BG95 Hardware Design* [online]. 2021-01. [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: [https://www.quectel.com/wp-content/uploads/2021/03/Quectel\\_BG95\\_Series\\_Hardware\\_Design\\_V1.3-1.pdf](https://www.quectel.com/wp-content/uploads/2021/03/Quectel_BG95_Series_Hardware_Design_V1.3-1.pdf).
27. QUECTEL. *BG77 Hardware Design* [online]. 2021-09. [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: [https://www.quectel.com/wp-content/uploads/2021/03/Quectel\\_BG77\\_Hardware\\_Design\\_V1.2.pdf](https://www.quectel.com/wp-content/uploads/2021/03/Quectel_BG77_Hardware_Design_V1.2.pdf).
28. QUECTEL. *BG600L-M3 Hardware Design* [online]. 2021-01. [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: [https://www.quectel.com/wp-content/uploads/2021/06/Quectel\\_BG600L-M3\\_Hardware\\_Design\\_V1.1.pdf](https://www.quectel.com/wp-content/uploads/2021/06/Quectel_BG600L-M3_Hardware_Design_V1.1.pdf).
29. QUECTEL. *BC68 Hardware Design* [online]. 2019-03. [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: [https://www.quectel.com/download/quectel\\_bc68\\_hardware\\_design\\_v1-3](https://www.quectel.com/download/quectel_bc68_hardware_design_v1-3).
30. QUECTEL. *BC65 Hardware Design* [online]. 2021-02. [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: [https://mc-technologies.com/wp-content/uploads/2024/01/Quectel\\_BC65\\_Hardware\\_Design\\_V1.0.pdf](https://mc-technologies.com/wp-content/uploads/2024/01/Quectel_BC65_Hardware_Design_V1.0.pdf).
31. QUECTEL. *Quectel selects Qualcomm 212 LTE IoT Modem for integration into BC660K-GL Module* [online]. 2020-11. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://www.quectel.com/news-and-pr/quectel-selects-qualcomm-212-lte-iot-modem-for-integration-into-bc660k-gl-module>.
32. REDONDO-IGLESIAS, Eduardo; VENET, Pascal; PELISSIER, Serge. Measuring Reversible and Irreversible Capacity Losses on Lithium-Ion Batteries. In: *2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. IEEE, říjen 2016. Dostupné z DOI: [10.1109/vppc.2016.7791723](https://doi.org/10.1109/vppc.2016.7791723).

33. MPOWERUK. *Battery Performance Characteristics* [online]. [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: <https://www.mpoweruk.com/performance.htm>.
34. SWIERCZYNSKI, Maciej; STROE, Daniel-Ioan; STAN, Ana-Irina; TEODORESCU, Remus; KAER, Soren Knudsen. Investigation on the Self-discharge of the  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$  nanophosphate battery chemistry at different conditions. In: *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*. IEEE, srpen 2014. Dostupné z DOI: [10.1109/itec-ap.2014.6940762](https://doi.org/10.1109/itec-ap.2014.6940762).
35. ECOPOWER. *LiFePO<sub>4</sub> Cell* [online]. 2023-10. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://medium.com/@ecopowerpack8/lifepo4-cell-276fc12cc9f3>.
36. TADIRAN BATTERIES. *Understanding battery self-discharge* [online]. 2001. [cit. 2024-03-30]. Dostupné z: <https://tadiranbat.com/wp-content/uploads/2022/03/Tadiran-White-paper-Understanding-Battery-self-dis-runnerslr.pdf>.
37. FANSO. *ER34615H 3.6V* [online]. [cit. 2024-03-30]. Dostupné z: <https://cdn.soselectronic.com/productdata/6d/20/6f8ba8c2/er34615h.pdf>.
38. FANSO. *SLC1025* [online]. 2016. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://cdn.soselectronic.com/productdata/c1/81/11723e38/slc1550.pdf>.
39. INSTRUMENTS, Texas. *TPS61094* [online]. 2021-12. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps61094.pdf?ts=1713142414261>.
40. ST. *STM32 ultra low power MCUs* [online]. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-ultra-low-power-mcus.html>.
41. ST. *STM32L0 series* [online]. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32l0-series.html>.
42. ST. *STM32L4 series* [online]. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32l4-series.html>.
43. ST. *STM32L4+ series* [online]. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32l4-plus-series.html>.
44. ST. *STM32L5 series* [online]. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32l5-series.html>.
45. ST. *STM32WLE series* [online]. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32wlex.html>.
46. OSRAM. *SFH 310-2/3* [online]. 2022-08. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: [https://dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-5980301/SFH%20310\\_EN.pdf](https://dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-5980301/SFH%20310_EN.pdf).
47. ANTENNAS, 2J. *2JW1024* [online]. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://www.2j-antennas.com/media/original/datasheets/2jw1024.pdf>.
48. ANTENNAS, 2J. *2JE41* [online]. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://www.2j-antennas.com/media/original/datasheets/2je41.pdf>.

49. TAG-CONNECT. *TC2070* [online]. 2024. [cit. 2024-04-18]. Dostupné z: <https://www.tag-connect.com/product/tc2070-idc>.
50. FANSO. *ER14250H 3.6V* [online]. [cit. 2024-03-30]. Dostupné z: <https://cdn.soselectronic.com/productdata/fd/7c/63ff65bb/er14250h.pdf>.

## Seznam použitého vybavení

- Fotoaparát Canon EOS R8
- Generátor funkcí Rigol DG1022
- Multimetr UNI-T UT50D
- Osciloskop Hantek DSO5202P
- Vektorový analyzátor NanoVNA
- Zdroj napětí UNI-T UTP3702S



## Seznam obrázků

1.1	Ukázka optického rozhraní a metrologické diody na elektroměru . . . . .	12
1.2	Ukázka průběhu spotřeby NB-IoT čipu . . . . .	12
2.1	Blokové a koncepční schéma APU . . . . .	18
2.2	Návrh desky plošného spoje APU 0.2 . . . . .	19
2.3	Návrh desky plošného spoje APU 1.0 . . . . .	20
2.4	Návrh desky plošného spoje APU 1.1 . . . . .	20
2.5	Návrh desky plošného spoje APU 1.2 . . . . .	20
2.6	Návrh desky plošného spoje APU 1.3 . . . . .	21
2.7	Návrh desky plošného spoje APU 2.1 . . . . .	23
2.8	Vizualizace desky plošného spoje APU 2.1 . . . . .	23
2.9	Ukázka výtisku prototypu krabičky pro APU 1.0 . . . . .	24
2.10	Ukázka výtisků obalu zařízení navrženého designérem . . . . .	24
2.11	Ukázka odlepování v rozích krabiček (tzv. <i>warping</i> ) . . . . .	25
2.12	Pilotní náčrty designu obalu zařízení . . . . .	26
2.13	Část loga společnosti AgreFlex . . . . .	26
2.14	Návrh krabičky z programu Solidworks . . . . .	27
2.15	Řez sondou – ukázka prostoru pro magnet . . . . .	28
2.16	Ukázka rozložené sondy . . . . .	29
2.17	Ukázka rozložené sondy . . . . .	29
2.18	Ukázka předchozí verze etikety . . . . .	30
2.19	Ukázka nové verze etikety . . . . .	31
3.1	Krok 1 – nalezení metrologické diody s koeficientem imp./kWh . . . . .	33
3.2	Krok 2a – odstranění plastové fólie ze samolepicí podložky disku . . . . .	33
3.3	Krok 2b – nalepený feromagnetický disk na elektroměru . . . . .	34
3.4	Krok 3a – upevnění sondy APU na disk na metrologické diodě . . . . .	34
3.5	Krok 3b – sonda zapojená na rozhraní elektroměru s metrologickou diodou . . . . .	34
3.6	Fotografie finální a složené APU 2.1 . . . . .	35
4.1	Ukázka naměřených dat z multimetru v logaritmické škále . . . . .	36
4.2	Napětí baterie ER14250H na čase s připojenou APU 1.3 . . . . .	39
4.3	Analýza spotřeby jednotlivých částí APU . . . . .	40

## Seznam tabulek

2.1	Porovnání vlastností některých LPWAN sítí [14–20] . . . . .	13
2.2	Porovnání klíčových parametrů NB-IoT čipů . . . . .	14
2.3	Porovnání samovybíjení u vybraných druhů baterií [32–35] . . . . .	15
2.4	Výběr důležitých parametrů baterie ER34615H . . . . .	15
2.5	Porovnání řad L0, L4, L4+ a L5 . . . . .	17
2.6	Několik významných parametrů mikrokontrolérů . . . . .	17
2.7	Porovnání obalů zařízení . . . . .	28
4.1	První měření na superkondenzátoru s energeticky neoptimalizovanou APU	38

## Seznam rovnic

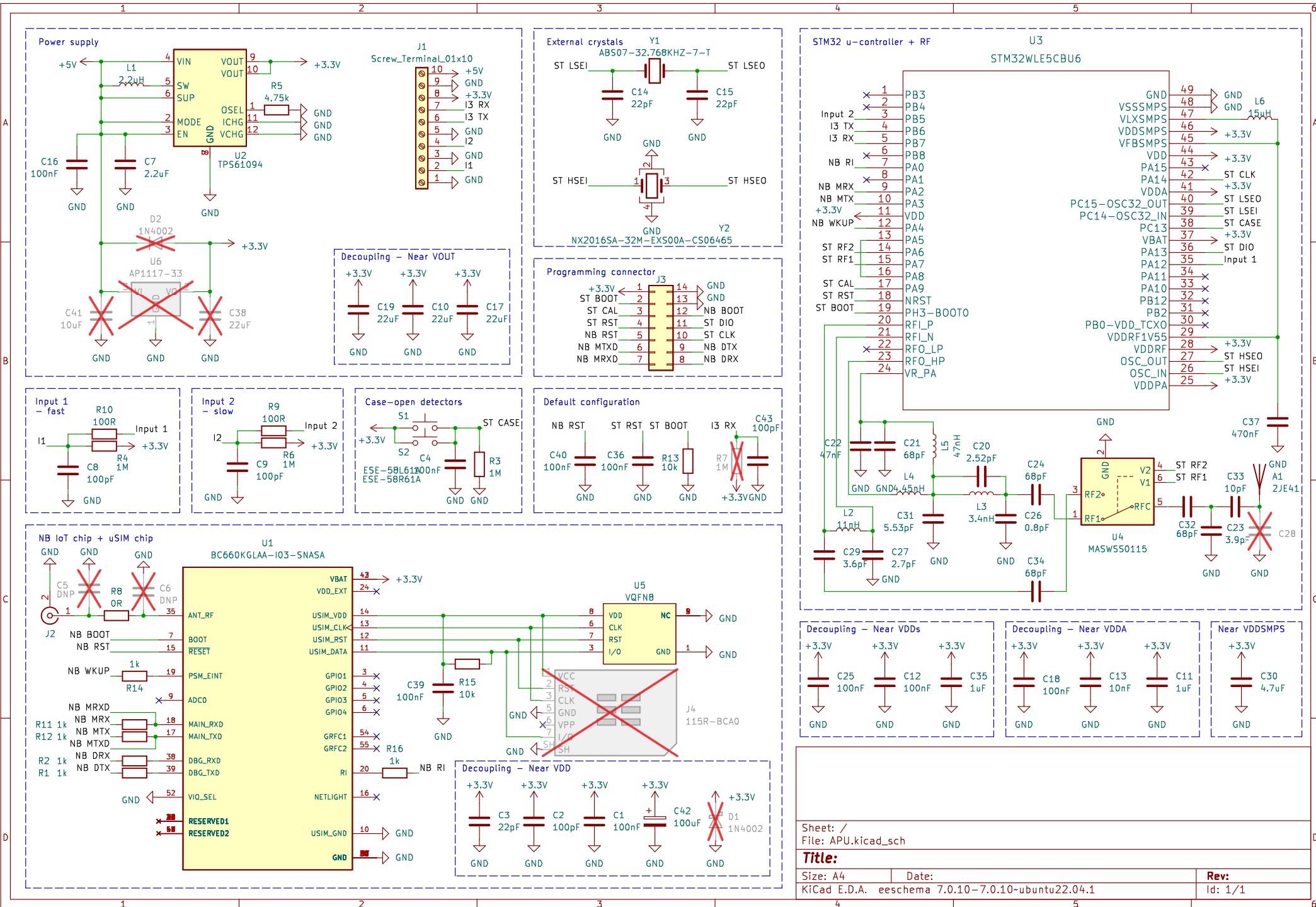
2.1	Predikovaná kapacita baterie za 5 let . . . . .	14
4.1	Výpočet skutečné difference napětí $\Delta U$ . . . . .	37
4.2	Výpočet spotřeby APU na základě úbytku napětí na superkondenzátoru .	38
4.3	Predikce výdrže baterie . . . . .	39
4.4	Predikovaná kapacita baterie v závislosti na době životnosti . . . . .	39

## Seznam zkratek

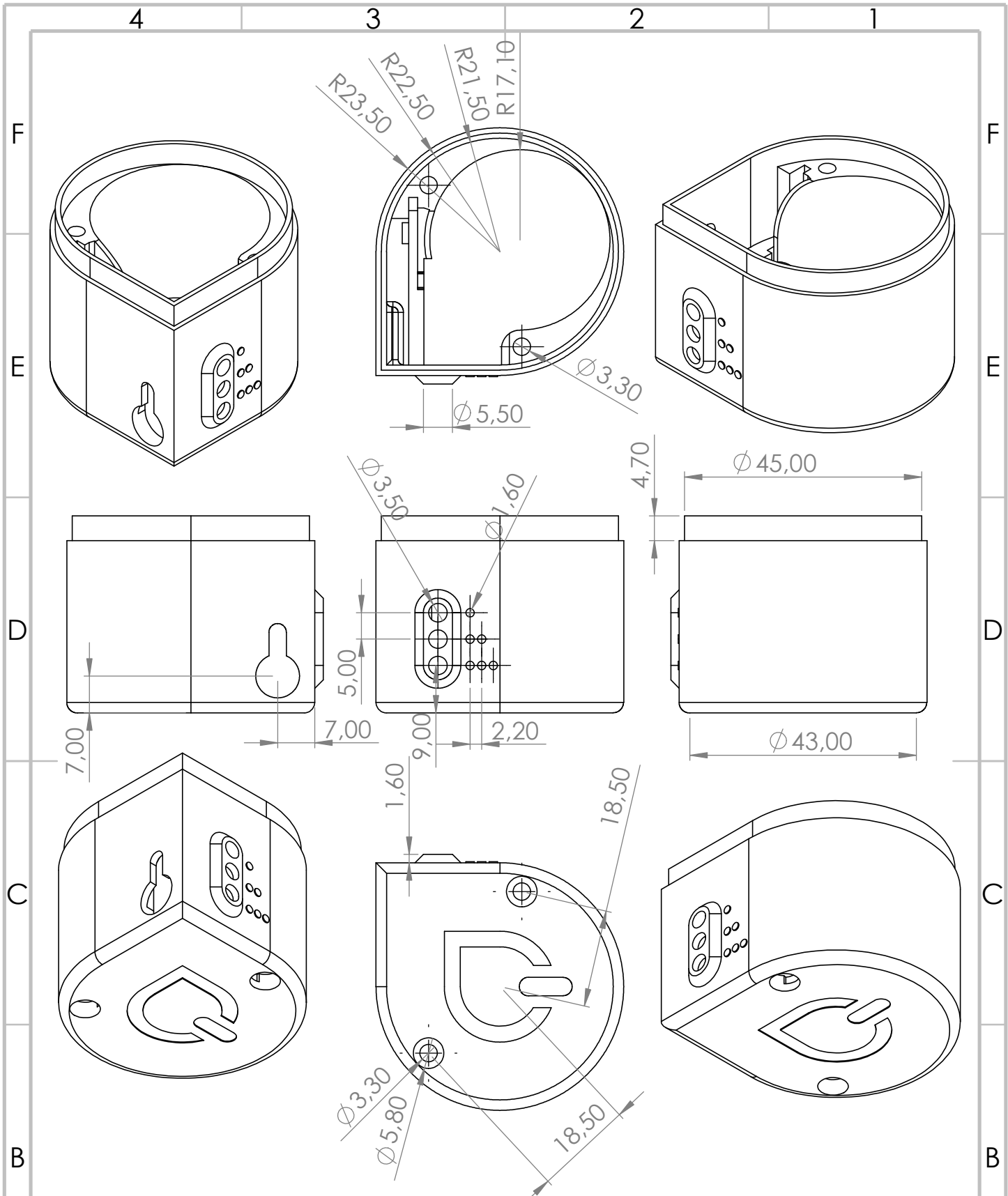
Zkratka	Význam zkratky	Český překlad
APU	AgreFlex Pulse Unit	Pulzní jednotka AgreFlexu
CSS	<i>Cascading Style Sheets</i>	Kaskádové styly
CSV	<i>Comma-separated value</i>	Čárkou oddělené hodnoty
DRX	<i>Discontinuous Reception</i>	-
eDRX	<i>Extended Discontinuous Reception</i>	-
FW	Firmware	-
HTML	<i>Hypertext Markup Language</i>	Hypertextový značkovací jazyk
HW	Hardware	-
ID	<i>Identifier</i>	Identifikátor
IR	<i>Infrared</i>	Infračervené
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>	Svítivá dioda
LoRa	<i>Long Range</i>	Dlouhý dosah
LoRaWAN	<i>Low Power Wide Area Networking</i>	-
MTN	-	Měřicí transformátor napětí
MTP	-	Měřicí transformátor proudu
NB-IoT	<i>NarrowBand-Internet of Things</i>	-
PET	<i>Polyethylene terephthalate</i>	Polyethylentereftalát
PETG	<i>Polyethylene terephthalate glycol</i>	Polyethylentereftalát + glykol
PLA	<i>Polylactic Acid</i>	Polylaktidová kyselina
PSM	<i>Power Saving Mode</i>	Režim úspory energie
QR	<i>Quick Response</i>	Rychlá odezva
SW	Software	-
VNA	<i>Vector Network Analyzer</i>	Vektorový analyzátor

## Seznam příloh

- Schéma APU 2.1
- Výkres obalu zařízení pro APU – spodní část
- Výkres obalu zařízení pro APU – vrchní část
- Výkres sondy pro APU – tělo pro fototranzistor
- Výkres sondy pro APU – víko



Sheet: /	Date:	Rev:
File: APU.kicad_sch		Id: 1/1
Title:		
Size: A4	KiCad E.D.A. eeschema 7.0.10-7.0.10-ubuntu22.04.1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
 SURFACE FINISH:  
 TOLERANCES:  
 LINEAR:  
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND  
 BREAK SHARP  
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN		
CHK'D		
APPV'D		
MFG		
Q.A		

TITLE:  
**APU 2.1**

DWG NO.  
**APU - krabička**

SCALE: 1:1

SHEET 1 OF 1

MATERIAL:  
 PLA@215/65

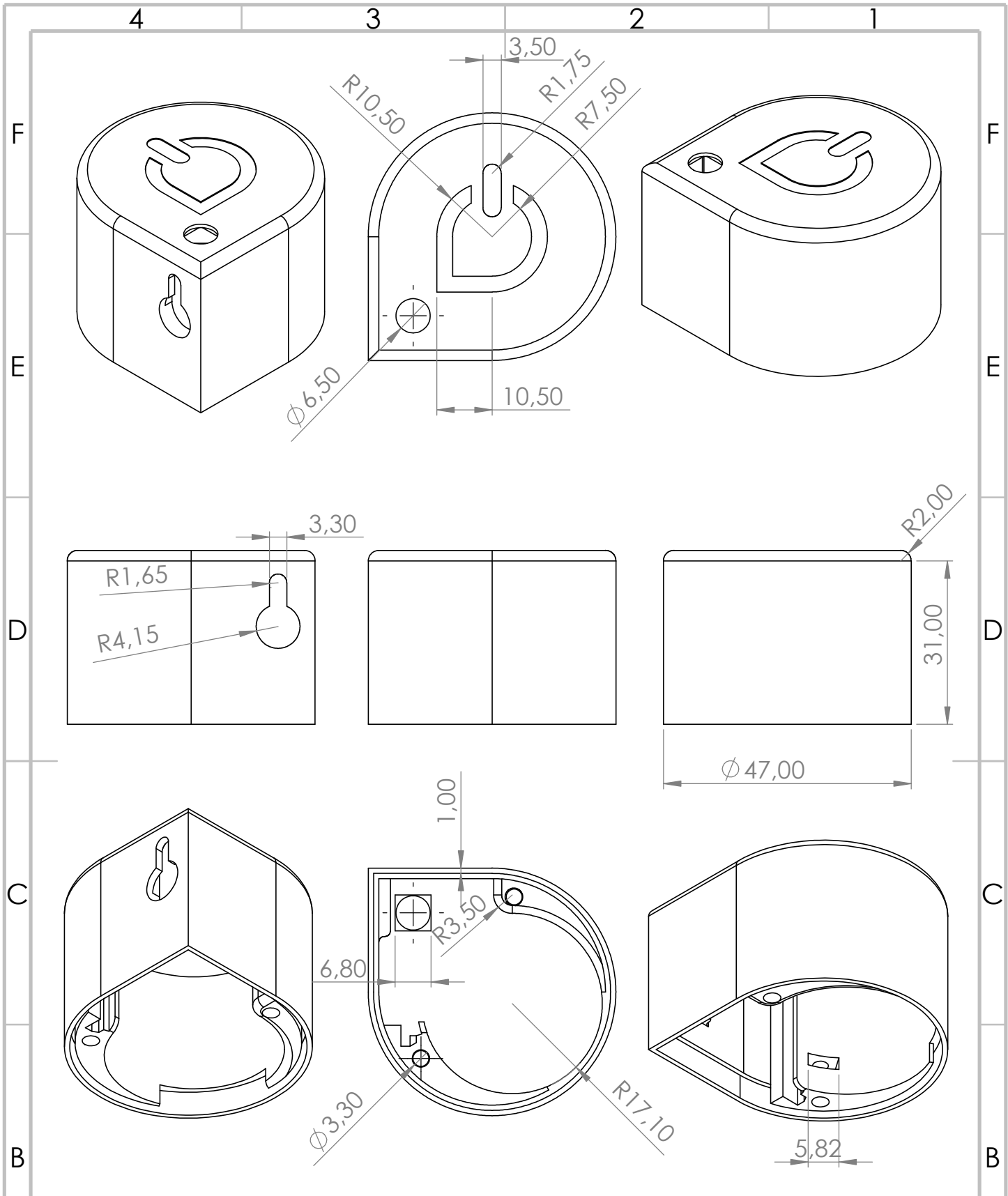
WEIGHT:

A4

A

A

4 3 2 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
 SURFACE FINISH:  
 TOLERANCES:  
 LINEAR:  
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND  
 BREAK SHARP  
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

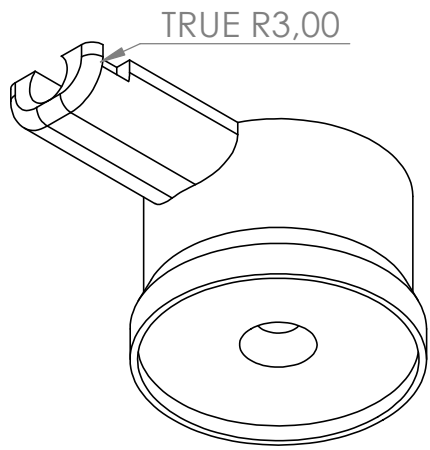
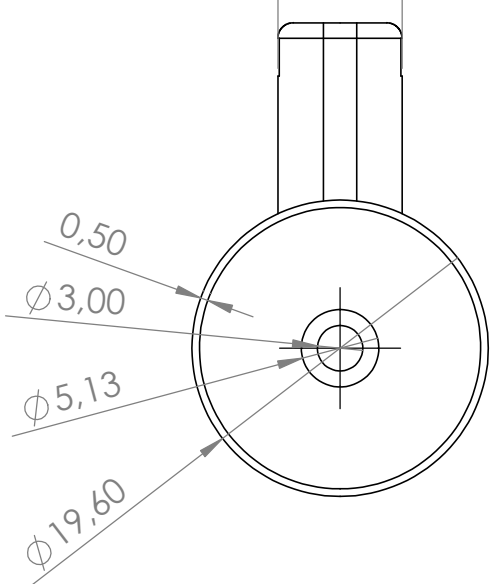
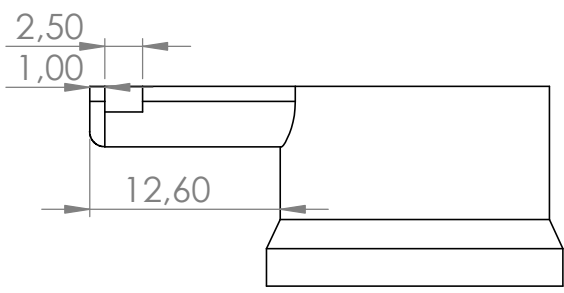
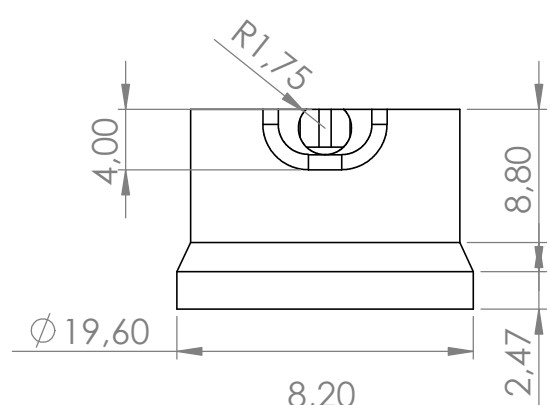
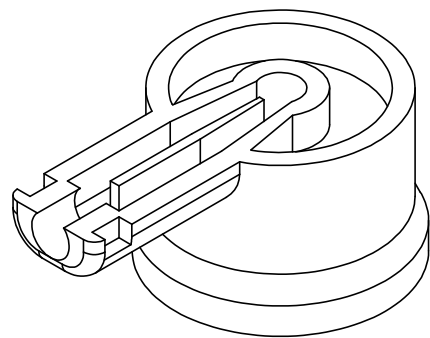
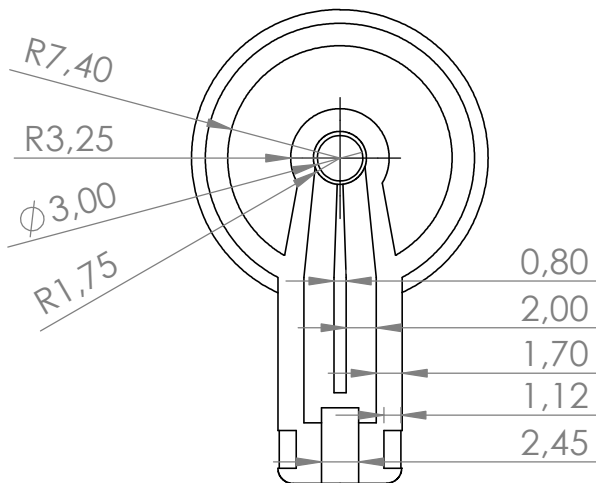
REVISION

NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN		
CHK'D		
APPV'D		
MFG		
Q.A		

TITLE:	<b>APU 2.1</b>	
DWG NO.	<b>APU - víko</b>	
MATERIAL:	PLA@218/65	
WEIGHT:	SCALE: 1:1	SHEET 1 OF 1

A4





UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
SURFACE FINISH:  
TOLERANCES:  
LINEAR:  
ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

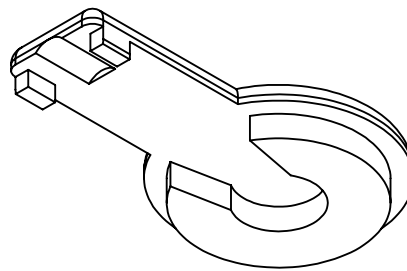
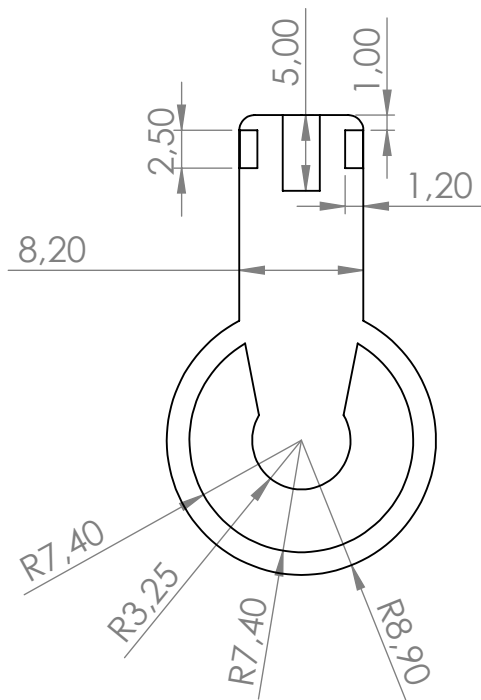
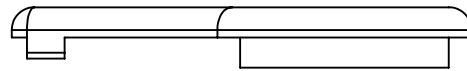
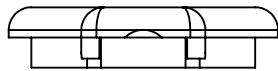
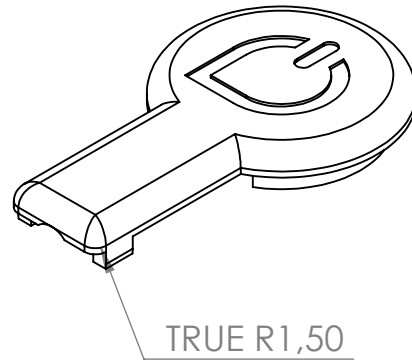
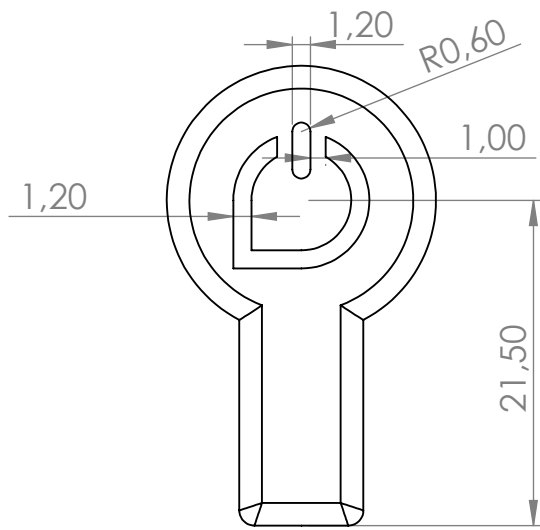
DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE	
DRAWN				
CHK'D				
APPV'D				
MFG				
Q.A				

TITLE:	
MATERIAL:	PLA@215/60
DWG NO.	Sonda - PT
WEIGHT:	
SCALE:2:1	SHEET 1 OF 1

A4



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
SURFACE FINISH:  
TOLERANCES:  
LINEAR:  
ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN			
CHK'D			
APPV'D			
MFG			
Q.A			
MATERIAL:			
PLA@215/60			
WEIGHT:			

TITLE:	
DWG NO.	Sonda - kryt
SCALE:2:1	SHEET 1 OF 1

A4