

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIOENGINEERING

KOMPAKTNÍ BLUETOOTH MULTIMETR

COMPACT BLUETOOTH MULTIMETR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Kolář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Stanislav Rozum

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Ondřej Kolář

ID: 203252

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Kompaktní Bluetooth multimetr

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte potřebné metody a protokoly pro realizaci kompaktního bezdrátového multimetru, který bude schopen měřit alespoň napětí, proud, výkon a odpor. Naměřené výsledky budou odesílány pomocí bezdrátové technologie Bluetooth Low Energy do chytrého telefonu nebo počítače. Pracovní rozsahy zvolte tak, aby bylo možné měřit nejběžnější hodnoty v oblasti elektroniky napájené do 50 V (např. +60 V DC, 0 až 2 A DC) s odchylkou menší než 5 %. Navrhněte desku plošných spojů, přičemž se zaměřte na kompaktní rozměry a nízkou spotřebu, neboť celé zařízení bude napájené z baterie. Připravte si protokol pro přenos dat mezi multimetrem a koncovým zařízením.

Osadte a oživte vyrobenou desku plošných spojů (případně funkční vzorek) a následně implementujte základní firmware pro multimetr. Otestujte (např. za pomoci ladícího rozhraní), zda měřicí část zařízení splňuje vstupní požadavky. Proveďte případné korekce a dokončete firmware. Vytvořte jednoduchou a přehlednou aplikaci pro chytrý telefon (počítač), kde se výsledky zobrazí. Specifikujte dosažené parametry zařízení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] TOWNSEND, Kevin., Robert. DAVIDSON, AKIBA. a Carles. CUFÍ. Getting started with Bluetooth low energy: tools and techniques for low-power networking. Revised First Edition. Sebastopol, CA: O'Reilly, 2014. ISBN 978-1-491-94951-1.

[2] The Android Arsenal. Bluetooth [online]. [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <https://android-arsenal.com>

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 4.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Stanislav Rozum

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalářská práce na téma Kompaktní Bluetooth multimetr rozebírá v první části technologii Bluetooth Low Energy. Popsány jsou jednotlivé vrstvy a protokoly jejího komunikačního řetězce. Dále jsou popsány některé obvody a metody využívané při měření elektrických veličin. V druhé části popisuje práce postup návrhu a realizace kompaktního multimetru komunikujícího pomocí Bluetooth Low Energy s aplikací v mobilním telefonu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Bluetooth Low Energy, multimetr, elektronická měření, operační zesilovač, mobilní aplikace

ABSTRACT

The first part of bachelor's thesis Compact Bluetooth multimeter discusses Bluetooth Low Energy technology. It describes individual layers and protocols of its communication chain. There are also described some of the electronic circuits and methods used for measuring in electronics. The second part of the bachelor's thesis describes practical design and implementation procedures of the compact multimeter which communicates with a smartphone application via Bluetooth Low Energy.

KEYWORDS

Bluetooth Low Energy, multimeter, electronic measurements, operational amplifier, smartphone application

KOLÁŘ, Ondřej. *Kompaktní Bluetooth multimetr*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/120570>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Stanislav Rozum.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Kompaktní Bluetooth multimetr“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu zdrojů na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Stanislavu Rozumovi za poskytnuté rady a doporučení při návrhu praktické části práce.

Brno

.....

podpis autora

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Úvod | 10 |
| 1 Teoretická část | 11 |
| 1.1 Bluetooth | 11 |
| 1.2 Bluetooth Low Energy | 12 |
| 1.2.1 Fyzická vrstva | 14 |
| 1.2.2 Linková vrstva | 15 |
| 1.2.3 Host Controller Interface | 16 |
| 1.2.4 Logical Link Control and Adaptation Protocol | 17 |
| 1.2.5 Security Manager Protocol | 17 |
| 1.2.6 Attribute Protocol | 18 |
| 1.2.7 Generic Access Profile | 19 |
| 1.2.8 Generic Attribute Profile | 20 |
| 1.3 Měření elektrických veličin | 22 |
| 1.3.1 Bezpečnost u číslicových měřicích přístrojích | 22 |
| 1.3.2 Operační zesilovače | 24 |
| 1.3.3 Převod proudu na napětí | 28 |
| 1.3.4 Převod odporu na napětí | 29 |
| 2 Praktická část | 30 |
| 2.1 Schéma zapojení | 30 |
| 2.1.1 Napájecí část | 31 |
| 2.1.2 Digitální část | 32 |
| 2.1.3 Analogová část | 33 |
| 2.2 Deska plošných spojů | 36 |
| 2.3 Komunikační protokol | 37 |
| 2.4 Software multimetru | 40 |
| 2.4.1 STM32F373 | 40 |
| 2.4.2 BL652 | 41 |
| 2.5 Konstrukce multimetru | 42 |
| 2.5.1 Oživení | 43 |
| 2.6 Kalibrace a kontrolní měření | 45 |
| 2.6.1 Napěťové rozsahy | 45 |
| 2.6.2 Proudový rozsah | 46 |
| 2.6.3 Odporové rozsahy | 47 |
| 2.7 Mobilní aplikace | 48 |
| 2.8 Popis uživatelského rozhraní a parametrů multimetru | 50 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.9 | Přístrojová krabička | 51 |
| 2.9.1 | Čelní štítek | 53 |
| 3 | Závěr | 54 |
| | Zdroje | 55 |
| | Seznam zkratek | 59 |
| | Seznam příloh | 61 |
| A | Schéma zapojení | 62 |
| A.1 | Strana 1 - Napájení a USB | 62 |
| A.2 | Strana 2 - Digitální část | 63 |
| A.3 | Strana 3 - Analogová část | 64 |
| B | Soupiska součástek | 65 |
| C | Plošný spoj (měřítko 2:1) | 66 |
| C.1 | Vrstva <i>Top copper</i> | 66 |
| C.2 | Vrstva <i>Bottom copper</i> | 66 |
| C.3 | Osazovací plán <i>Top</i> | 67 |
| C.4 | Osazovací plán <i>Bottom</i> | 67 |
| D | Program mobilní aplikace | 68 |
| E | Elektronické přílohy | 70 |

Seznam obrázků

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Statistika členů Bluetooth SIG | 11 |
| 1.2 | Logo Bluetooth | 12 |
| 1.3 | Komunikační řetězec BLE | 13 |
| 1.4 | Kanály BLE | 14 |
| 1.5 | Zjednodušená ukázka vytvoření spojení | 15 |
| 1.6 | Srovnání různých hardwarových řešení s BLE | 16 |
| 1.7 | Diagram korespondujících rolí, módů a procedur | 20 |
| 1.8 | Příklad struktury atributů GATT serveru | 21 |
| 1.9 | Blokové schéma převodu signálů v digitálním měřicím přístroji | 22 |
| 1.10 | Příklad označení maximálních napětí multimetru | 23 |
| 1.11 | Schematická značka ideálního OZ | 24 |
| 1.12 | Schéma napěťového sledovače | 25 |
| 1.13 | Schéma neinvertujícího zesilovače | 25 |
| 1.14 | Schéma invertujícího zesilovače | 26 |
| 1.15 | Schéma přístrojového zesilovače | 27 |
| 1.16 | Schéma neinvertujícího komparátoru a jeho převodní charakteristika | 27 |
| 1.17 | Převod proudu na napětí úbytkem na odporu | 28 |
| 1.18 | Princip Hallovy sondy | 29 |
| 1.19 | Obecný princip převodu odporu na napětí | 29 |
| 2.1 | Navržené blokové schéma Bluetooth multimetru | 30 |
| 2.2 | Vizualizace DPS - horní vrstva | 36 |
| 2.3 | Vizualizace DPS - dolní vrstva | 36 |
| 2.4 | Ukázka programu UwTerminalX | 38 |
| 2.5 | Ukázka mobilní aplikace nRF Connect | 39 |
| 2.6 | Zjednodušený diagram programu mikrokontroléru STM32F373 | 40 |
| 2.7 | Ukázka textového editoru Notepad++ a kódu v jazyce SmartBASIC | 41 |
| 2.8 | Fotografie osazeného multimetru - horní strana | 42 |
| 2.9 | Fotografie osazeného multimetru - spodní strana | 42 |
| 2.10 | Ukázka programu STM32 ST-LINK Utility | 44 |
| 2.11 | Graf absolutní relativní odchylky měřeného napětí | 46 |
| 2.12 | Graf absolutní relativní odchylky měřeného proudu | 47 |
| 2.13 | Snímek z webové aplikace pro zjišťování aproximačních funkcí | 48 |
| 2.14 | Snímky obrazovky aplikace BTmeter | 49 |
| 2.15 | Popis uživatelských prvků multimetru | 50 |
| 2.16 | Vizualizace sestavené přístrojové krabičky | 51 |
| 2.17 | Vizualizace dolní části přístrojové krabičky | 52 |
| 2.18 | Vizualizace horní části přístrojové krabičky | 52 |

| | |
|--|----|
| 2.19 Vizualizace čelní strany multimetru s nalepeným štítkem | 53 |
|--|----|

Seznam tabulek

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Srovnání kompatibility zařízení s klasickým Bluetooth a BLE | 13 |
| 2.1 | Přehled implementovaných veličin do komunikačního protokolu UART | 37 |
| 2.2 | Přehled definované GATT služby | 38 |

Úvod

Cílem této práce bylo vytvořit prototyp jednoduchého multimetru, který je především malých rozměrů a data jsou z něj zobrazována aplikací v mobilním telefonu, kam jsou bezdrátově odesílána. Kromě měřicích vstupů obsahuje také USB port určený k nabíjení zabudovaného akumulátoru a případnou komunikaci s počítačem.

V teoretické části práce je podrobně popsána technologie Bluetooth Low Energy, která je využita pro komunikaci mezi mobilním telefonem a multimetrem. Tato technologie je v dnešní době velice oblíbená. Umožňuje různým zařízením mezi sebou komunikovat na krátké vzdálenosti. Často se jedná o připojení různých periférií k chytrým telefonům či počítačům.

Dále se teoretická část práce zaměřuje na některé metody a obvody využívané při měření elektrických veličin. Jedná se především o obvody s operačními zesilovači, které se nachází prakticky ve všech současných elektronických zařízeních. Část z těchto zapojení pak byla implementována do prototypu vytvořeného multimetru.

Podrobný popis postupu při jednotlivých krocích tvorby multimetru je rozveden v praktické části práce, během které byl kromě využití používaných měřicích obvodů, použit také vlastní návrh části obvodu pro měření elektrického odporu.

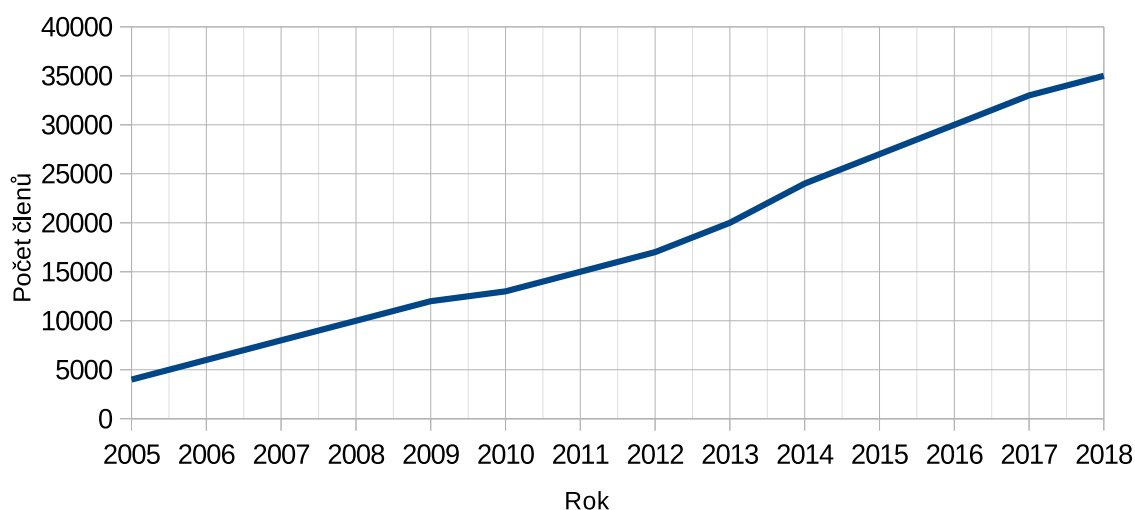
1 Teoretická část

1.1 Bluetooth

Bluetooth je bezdrátová technologie umožňující přenos dat mezi různými zařízeními (např. mobilní telefony, počítače a jejich periferie...). Oproti technologiím, jako například Wi-Fi, je Bluetooth navrženo především s malou energetickou náročností. Kvůli tomu cílí na kratší vzdálenosti s menší datovou propustností.

V roce 1998 vznikla organizace Bluetooth SIG¹ tvořená pěti zakládajícími členskými společnostmi [1]. Jejím cílem bylo tuto technologii vyvíjet a standardizovat mezi výrobci, kvůli zajištění vzájemné kompatibility jednotlivých zařízení. První mezinárodní standard Bluetooth byl vydán v roce 2002 s označením IEEE² 802.15.1 2002 [3].

Každý výrobce, který chce ve svých produktech technologii Bluetooth využít, se musí stát členem Bluetooth SIG. Ze statistik počtu členů dostupných na webu [1] lze tedy vidět, že popularita této technologie neustále roste, viz graf na obr. 1.1.



Obr. 1.1: Statistika členů Bluetooth SIG

¹Special Interest Group - organizace zaštiťující určitý zájem

²Institute of Electrical and Electronics Engineers

Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství

Jako zajímavost lze považovat původ jména Bluetooth a význam jeho typického loga. Při počátcích vývoje této bezdrátové technologie bylo jedním z vývojářů navrženo dočasné pojmenování po dánském králi Haraldovi I., přezdívanému Modrozub (angl. Bluetooth), kterému se roku 958 podařilo, díky jeho diplomatickým schopnostem, uklidnit válečné rozepře tamějších severských kmenů a iniciovat jejich vzájemnou komunikaci. Právě tento čin je jakousi metaforou k hlavní myšlence technologie Bluetooth, tj. technologie umožňující komunikovat široké škále elektronických zařízení mezi sebou. Ačkoliv byl tento název původně pouze dočasný a měl být nahrazen jednou z několika jiných variant, stal se nakonec i variantou finální. Také logo je spjato s králem Haraldem. Bílý piktogram v modrém poli je kombinací středověkých run představující iniciály – ᚱ (h – Harald) a ᚷ (b – Bluetooth) [2].



Obr. 1.2: Logo Bluetooth [2]

1.2 Bluetooth Low Energy

V roce 2010 vydala Bluetooth SIG novou verzi specifikace Bluetooth 4.0, která jako první zahrnuje také Bluetooth Low Energy (BLE) [1]. Tato technologie byla navržena se zaměřením na nové cíle oproti původnímu Bluetooth. Kromě zvýšení datové propustnosti se vývojáři zaměřili především na snížení energetických nároků. Díky tomu lze s BLE konstruovat mobilní zařízení s větší výdrží a menšími rozměry.

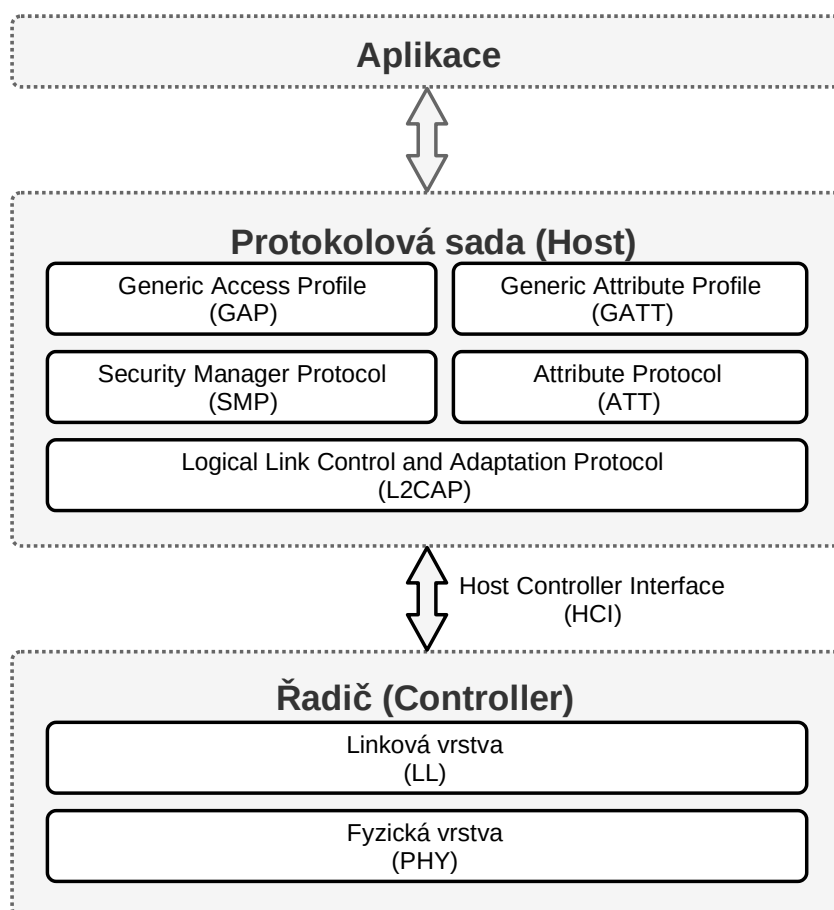
Inovace s sebou však přinesly i svá úskalí. Ačkoliv specifikace Bluetooth 4.0 a vyšší definují jak klasické Bluetooth tak i BLE, nejsou spolu tyto standardy zcela kompatibilní. V praxi se lze tedy setkat se třemi typy zařízení, jejichž vzájemnou kompatibilitu můžeme vidět v [tab. 1.1](#).

Zatím poslední vydanou verzí je Bluetooth 5.1, která byla představena začátkem roku 2019. Nejzajímavější novinkou této verze je možnost určení směru, ve kterém se ostatní zařízení nachází [5]. To lze v praxi využít například k přesné lokalizaci chytrých telefonů. Díky tomu pak lze uživatele lehce navigovat pomocí aplikace.

| Verze zařízení | Podpora klasického Bluetooth | Podpora BLE |
|---|------------------------------|-------------|
| <4.0 Bluetooth | Ano | Ne |
| >4.0 Single-Mode (Bluetooth Smart) | Ne | Ano |
| >4.0 Dual-Mode (Bluetooth Smart ready) | Ano | Ano |

Tab. 1.1: Srovnání kompatibility zařízení s klasickým Bluetooth a BLE, vzor [4]

BLE ke svému fungování využívá řadu protokolů na různých vrstvách komunikačního řetězce, které dohromady poskytují spolehlivou a snadno implementovatelnou platformu pro bezdrátovou komunikaci. Při vývoji nových zařízení využívajících BLE tedy není nezbytně nutné se zabývat nižšími vrstvami.



Obr. 1.3: Komunikační řetězec BLE, vzor [4]

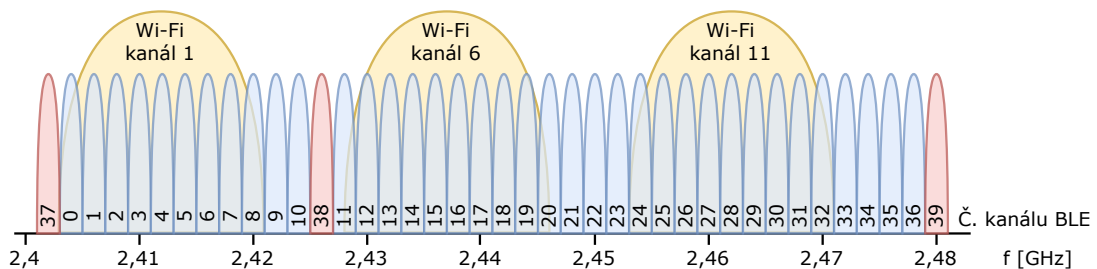
1.2.1 Fyzická vrstva

Fyzická vrstva (PHY³) je nejnižším prvkem každého komunikačního řetězce. V případě bezdrátových se stará o příjem signálů v podobě elektromagnetického vlnění, které je zachyceno, demodulováno a převedeno do digitální podoby. Taktéž se stará o převod digitálního signálu, jeho modulaci a vyslání.

BLE pracuje v ISM⁴ pásmu 2,4 GHz, které možno volně využívat, bez nutnosti platby licenčních poplatků. Jeho využití však není zcela bez regulace. Uživatel je povinen dodržovat podmínky daného státu, v České republice vydávané Českým telekomunikačním úřadem, které zpravidla omezují například maximální možný vysílaný výkon, nutnost užití homologovaných zařízení atp.

Vzhledem k možnosti volného využití pásma 2,4 GHz je toto pásmo hojně využívané především pro provoz Wi-Fi sítí. Dále na tomto kmitočtu pracují také mikrovlnné trouby. Všechna tato zařízení představují problém v podobě vzájemného rušení. Aby se jeho vliv, ale i vliv ostatních BLE zařízení v blízkém okolí minimalizoval, využívá se metody AFH⁵. Ta spočívá na předem domluvených pravidelných skocích mezi jednotlivými kanály.

Kmitočtové spektrum BLE je rovnoměrně rozděleno na 40 kanálů s pevně stanovenými nosnými kmitočty a šířkou. Kanály jsou po 2 MHz rozmístěny od 2402 MHz do 2480 MHz. Číslování kanálů je patrné z obr. 1.4. Za povšimnutí stojí rozmístění tzv. *Advertising* kanálů 37, 38 a 39. Ty využívá již zmíněná linková vrstva pro navázání a udržení spojení, proto je důležité zajistit jejich co nejmenší možné zarušení. Toho bylo dosaženo umístěním mimo definované základní a často využívané kanály Wi-Fi, takže navázání spojení je možné i v přítomnosti těchto sítí [6].



Obr. 1.4: Kanály BLE, vzor [6]

Datové symboly jsou frekvenčně modulovány pomocí GFSK⁶ klíčování. Jeho výhodou je zachování úzkého pásma kanálu, oproti klíčování bez filtru.

³Physical Layer - fyzická vrstva

⁴Industrial, Scientific and Medical - soubor kmitočtových pásem k volnému užití

⁵Adaptive Frequency Hopping - metoda využití spektra průběžnými změnami nosného kmitočtu

⁶Gaussian Frequency Shift Keying - metoda modulace frekvenčním posunem

1.2.2 Linková vrstva

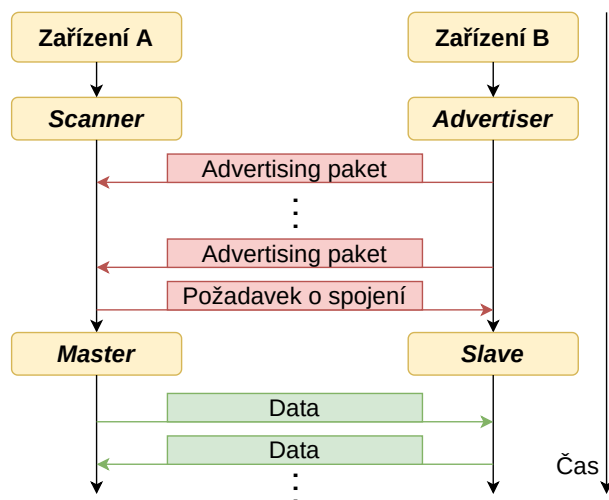
Linková vrstva u BLE zajišťuje již zmíněné skoky mezi kanály v průběhu přenosu dat. Před navázáním vlastního spojení využívá zařízení pouze *Advertising* kanály. V tomto případě může zařízení zastávat tyto role:

- *Advertiser* - vysílá tzv. *advertising* pakety, kterými oznamuje svou existenci a základní informace o svých službách,
- *Scanner* - vyčkává na přijetí libovolného *advertising* paketu.

Existují dva různé způsoby jak se může *scanner* chovat. První varianta je pasivní, kdy *scanner* pouze vyčkává na přijetí libovolného *advertising* paketu. Druhým způsobem je aktivní skenování, které spočívá ve vyslání paketu s požadavkem na odpověď. Tohoto může *scanner* využít ke zjištění dalších informací o protějším zařízení, přičemž se poté může rozhodnout, zda s ním naváže spojení. To může vyvolat vyslání požadavku, po jehož přijetí obě zařízení přejdou do nových rolí:

- *Slave* - tuto roli získá původní *advertiser*,
- *Master* - naopak *scanner* přebírá roli řídicí a s ní i řízení další komunikace.

Tento způsob komunikace již umožňuje obousměrnou výměnu dat, u které je zajištěno, že všechna data byla bezchybně doručena. Ověření probíhá 24bitovým cyklickým redundantním součtem (CRC). Zároveň je spojení od této chvíle šifrováno pomocí AES⁷-128 [6].



Obr. 1.5: Zjednodušená ukázka vytvoření spojení, vzor [6]

Pokud by aplikace vystačovala s nezabezpečenou jednosměrnou komunikací a menšími nároky na přenesený objem dat, je možné spojení nenavazovat a tedy ponechat obě zařízení v původních rolích. Data pak lze přenášet pomocí speciálních *advertising* paketů určených k tomuto účelu [6].

⁷Advanced Encryption Standard - standardizovaný šifrovací algoritmus

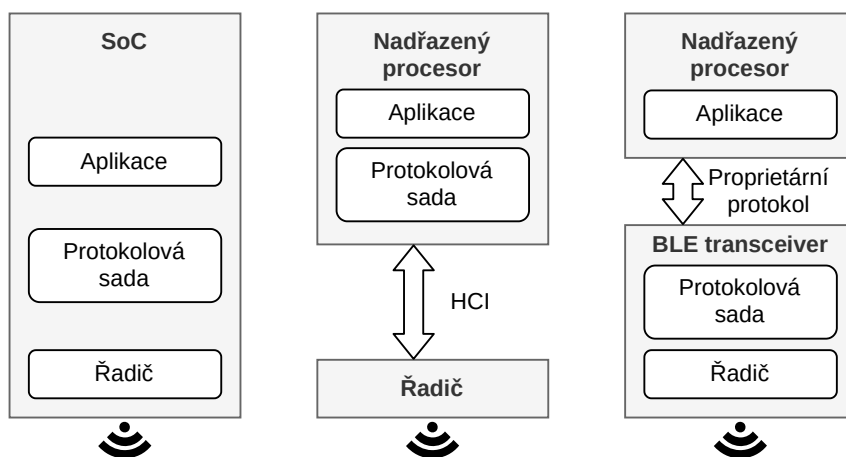
1.2.3 Host Controller Interface

HCI je standardizované rozhraní mezi řadičem a nadřazeným procesorem, ve kterém běží protokolová sada. Jelikož je pro správnou funkci nezbytné, aby řadič pracoval s naprosto přesným časováním, bylo nutné ho pomyslně oddělit od protokolové sady a aplikace, které již na tomto časování nejsou přímo závislé.

Jelikož řadič a nadřazený procesor jsou dva fyzické integrované obvody a HCI samo o sobě nedefinuje fyzickou vrstvu, musí být řadič k procesoru připojen pomocí některé sběrnice, například UART⁸ či USB [4]. Pro představu lze uvést jako příklad BLE řadič v podobě USB donglu, který obsahuje pouze již zmíněné dvě nejnižší vrstvy. Zbývající náležitosti jsou zpracovávány operačním systémem počítače.

Avšak v dnešní době, kdy existují technologie pro výrobu komplexních integrovaných obvodů, jsou na trhu i tzv. SoC⁹ řešení. Takový čip obsahuje mimo řadiče také procesor, mnohdy vícejadrový, schopný zpracovávat nejen protokolovou sadu BLE, ale i samotnou aplikaci. Jejich výhodou je především úspora místa na plošném spoji a také menší spotřeba energie. Kromě toho také výrobci takových čipů zpravidla poskytují již hotový firmware s protokolovou sadou a API¹⁰, díky kterým je vývoj aplikací jednoduchý a rychlý oproti přímé komunikaci s řadičem pomocí HCI.

Využívají se také řešení, která se skládají sice ze dvou integrovaných obvodů, ale s rozdílem oproti prvnímu zmíněnému případu, že čip s řadičem obsahuje i protokolovou sadu. Při použití takového čipu je však nutné si pohlídat, jaký komunikační protokol mu výrobce určil [4].



Obr. 1.6: Srovnání různých hardwarových řešení s BLE, vzor [4]

⁸Universal Asynchronous Receiver-Transmitter - univerzální asynchronní rozhraní

⁹System on Chip - integrovaný obvod obsahující všechny dílčí části elektronického zařízení v jediném čipu

¹⁰Application Programming Interface - sbírka předpřipravených knihoven tvořící softwarové rozhraní pro zjednodušení vývoje aplikací

1.2.4 Logical Link Control and Adaptation Protocol

L2CAP je protokol zodpovědný především za tvorbu standardních paketů pro nižší vrstvy komunikačního řetězce a tedy dělení delších bloků dat, která mohou mít různou délku a formát. Zároveň je navržen tak, že je schopný průběžně přebírat data střídavě od nadřazených protokolů SMP a ATT¹¹. Díky tomu umožňuje vytvářet několik pomyslně oddělených spojení.

Obdobně z pohledu příjemce dostává L2CAP od nižších vrstev pakety, které mohou být přijaty ve špatném pořadí, či některé úplně ztraceny. Jsou tedy seřazeny a poté z nich sestavena přijatá data. Ta jsou poté předána příslušným vyšším protokolům [4].

1.2.5 Security Manager Protocol

SMP je souhrn prostředků pro zabezpečení komunikace. Protože BLE je bezdrátová technologie, je velice snadné tuto komunikaci odposlouchávat třetí stranou (MITM¹² útok). Proto je ve většině aplikací nutné zabezpečení dat jejich šifrováním.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.2.2, o fyzické šifrování a dešifrování se stará linková vrstva, která je na to vybavena hardwarovými prostředky. Toto řešení je výhodné, protože se jedná o výpočetně náročné algoritmy, pokud jsou prováděny softwarově. Nicméně linková vrstva již nezajišťuje generování a vzájemnou výměnu šifrovacích klíčů mezi zařízeními, o to se stará právě SMP [4].

Zabezpečení komunikace probíhá formou pomyslného propojení obou zařízení, to může být dvojího typu:

- *Pair*, při kterém dojde k výměně krátkodobých šifrovacích klíčů (STK¹³), které jsou dále využívány k zabezpečené komunikaci. Tyto klíče si zařízení neukládají, takže po zrušení spojení či výpadku napájení jsou ztraceny. Jejich vzájemné předání může probíhat třemi různými způsoby:
 - mohou být předány nezašifrovanou formou. To však neřeší problém MITM útoku, protože klíče mohou být snadno zneužity. Nicméně jde o nejrychlejší a nejjednodušší způsob.
 - Klíče mohou být zašifrovány kódem, který musí být ručně zadán do obou zařízení, nebo může být jedním zařízením vygenerován a musí být do druhého opsán.
 - Posledním způsobem je přenos klíčů jiným komunikačním kanálem, typicky pomocí NFC¹⁴.

¹¹Attribute Protocol - viz kapitola 1.2.6

¹²Man in the Middle Attack - typ útoku spočívající v odposlechu komunikace třetí stranou

¹³Short Term Key - krátkodobý (dočasný) šifrovací klíč

¹⁴Near Field Communication - bezdrátová technologie pro komunikaci na krátké vzdálenosti

- *Bond*¹⁵ je oproti tomu spojení obnovitelné. Při jeho vytváření je nejprve navázána již zmíněná dočasná zabezpečená komunikace. Až při ní jsou teprve přeneseny dlouhodobé šifrovací klíče (LTK¹⁶). Tyto klíče jsou pak v obou zařízeních uložena do nevolatilní paměti a lze je tedy znovu využívat po předchozím zrušení a opětovném vytvoření spojení. V praxi tedy uživatel provádí párování dvou zařízení pouze poprvé a při dalších zapnutích se již spojují automaticky [4].

1.2.6 Attribute Protocol

ATT je protokol, který definuje velice jednoduchý způsob pro přenos uživatelských dat pomocí server/klient vztahu. Z pohledu tohoto protokolu může být každé BLE zařízení serverem, klientem nebo obojím. Zároveň definuje metody jakými si mohou klient a server tato data posílat.

Data jsou v serveru rozdělena do jednotlivých atributů. Každý z nich představuje jedinou část dat či hodnotu. Aby server i klient mohli atributy identifikovat, je součástí každého z nich také tzv. *handle*, který představuje jeho 16bitové identifikační číslo. Pokud si chce například klient přečíst určitá data atributu ze serveru, musí mu poslat požadavek právě s tímto identifikačním číslem.

Dále je součástí atributu také 2, 4 nebo 16bajtové UUID¹⁷, které označuje jaká data jsou v něm obsažena. Ačkoliv může UUID naznačovat, že se jedná o unikátní identifikátor atributu a jeho handle je tedy zbytečný, není tomu tak. Server může obsahovat více než jeden atribut se stejným UUID. V tomto případě je patrné, že jediný způsob jak tyto atributy rozlišit, je jejich *handle* [4].

Poslední náležitostí každého atributu je oprávnění, jaké akce může klient po serveru u dotyčného atributu požadovat.

- Zápis/čtení - Klient může z atributu data číst, ale také je do něj zapisovat.
- Zápis - Klient může do atributu data zapsat, ale nikoliv je číst.
- Čtení - Klient může z atributu data přečíst, ale nikoliv je zapsat.
- Žádné - Klient nemůže do atributu data zapisovat, ani je z něj číst.

¹⁵Ačkoliv v angličtině jsou termíny *Pairing* a *Bonding* jednoznačně rozlišeny a každý má svůj význam, je běžně do češtiny překládán pouze termín *Bonding*, jakožto *párování*.

¹⁶Long Term Key - dlouhodobý (trvalý) šifrovací klíč

¹⁷Universally Unique Identifier - univerzální unikátní identifikační číslo

1.2.7 Generic Access Profile

GAP je společně s GATT¹⁸ nejvyšší vrstvou protokolové sady BLE. S ní tedy většinou přichází do styku výrobce, který chce využít již připraveného hardwaru od různých výrobců. GAP definuje veškerý souhrn funkcí a metod nutných pro kompletní řízení komunikace mezi zařízeními. Tyto funkce jsou dále rozděleny na menší úkony, kterými jsou již pověřovány nižší vrstvy.

Role

Každé zařízení může před ostatními zařízeními vystupovat ve čtyřech různých rolích, které určují následnou činnost zařízení. Tyto role jsou úzce spjaty s rolemi linkové vrstvy (viz kapitola 1.2.2), protože mají podobný účel. Nelze je však s nimi zaměňovat, protože každá z nich definuje prováděné úkony na různých úrovních [4].

- **Broadcaster**

Zařízení nastavené v této roli je určeno k pravidelnému vysílání malých nezábezpečených dat pomocí *advertising* paketů. Z toho plyne, že každé zařízení v okolí, které tyto pakety fyzicky přijme, si může vyslaná data přečíst. Z povahy této funkcionality není žádoucí, aby se jiná zařízení k tomuto tzv. *beaconu* připojovala. Z pohledu linkové vrstvy je tedy toto zařízení neustále v roli *advertiser*, aniž by kdykoliv přešel do role *slave*.

- **Observer**

Role *observer* je přesným opakem *broadcasteru*. Jeho účelem je pouze přijímání *advertising* paketů a čtení dat v nich obsažených. Ani tato role není určena pro vytváření spojení s ostatními zařízeními, takže na linkové vrstvě má neměnnou roli *scanner*.

- **Central**

Tato role je na rozdíl od předchozích zmíněných již určena k vytváření spojení s ostatními zařízeními a je tedy již schopna, nikoliv však nutně, poskytovat soukromou a zabezpečenou komunikaci. *Central* zařízení je schopno navázat vícero takovýchto nezávislých spojení najednou, přičemž musí samo tato spojení iniciovat odpovědí na *advertising* pakety, čímž si vybírá, se kterými konkrétními zařízeními v dosahu chce komunikovat.

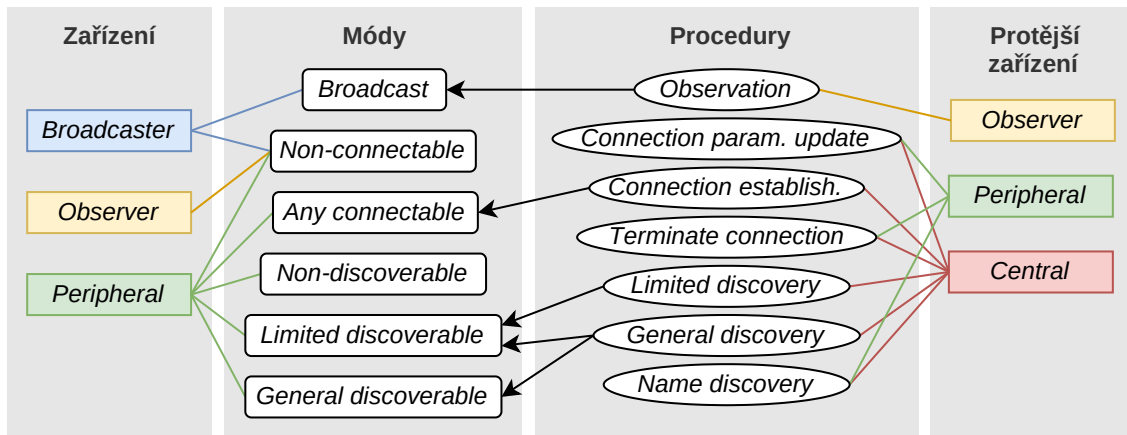
- **Peripheral**

Tato role je protějškem k roli *Central*, se kterým může navázat spojení pouze po přijetí požadavku. Nejprve je tedy na úrovni linkové vrstvy v roli *advertiser*. Při vytvoření spojení přechází do role *slave*.

¹⁸Generic Attribute Profile - viz kapitola 1.2.8

Módy a procedury

GAP definuje několik módů a procedur, které slouží především ke vzájemnému objevování zařízení v dosahu, ale také vytvoření a zrušení spojení mezi nimi. Každé roli přísluší jen některé módy a procedury, které lze využít.



Obr. 1.7: Diagram korespondujících rolí, módů a procedur

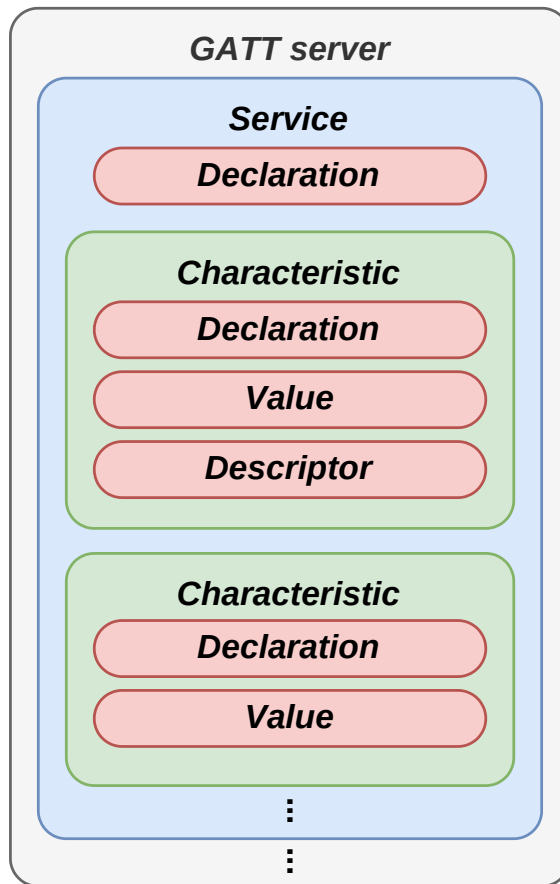
Nejjednodušší vztah mezi sebou mají *broadcaster* a *observer*. Jejich komunikace zahrnuje pouze mód *broadcast*, ve kterém zařízení v pravidelných intervalech vysílá *advertisement* pakety obsahující přenášená data. Jejich objem je však omezen maximální délkou paketu. Libovolný *observer* v okolí může tyto pakety přijímat procedurou *observation*. O tom, zda byly *broadcasterem* vyslané pakety někým přijaty, případně kolik zařízení je přijalo, nemá *broadcaster* žádnou odezvu [4].

1.2.8 Generic Attribute Profile

Poslední částí protokolové sady BLE je GATT. Jedná se o rozšíření protokolu ATT¹⁹, který definuje pouze atributy, jakožto základní buňky pro přenos dat. GATT tyto atributy skládá do hierarchických struktur, díky kterým je možné jednotlivé části přenášených dat uspořádat do logických celků.

Zařízení, které pracuje jako GATT server, seskupuje atributy do definované struktury. Ta musí být dodržena, žádný atribut nesmí být deklarován samostatně. Příklad jak taková struktura může vypadat je na obr. 1.8 [4].

¹⁹Attribute Protocol - viz kapitola 1.2.6



Obr. 1.8: Příklad struktury atributů GATT serveru, vzor [6]

Protože technologie BLE vznikla především se zaměřením na tzv. *wearables* zařízení, která jsou určena ke každodennímu nošení na lidském těle, je součástí specifikace GATT také řada standardních atributů (služeb, charakteristik atd.). Ty jsou povětšinou navrženy k různým zdravotním aplikacím (např. měření srdečního rytmu, krevního tlaku apod.). A protože se jedná o standardizované atributy, mají vyhrazený rozsah UUID²⁰. Tyto identifikátory tedy nelze použít pro jiné aplikace [7].

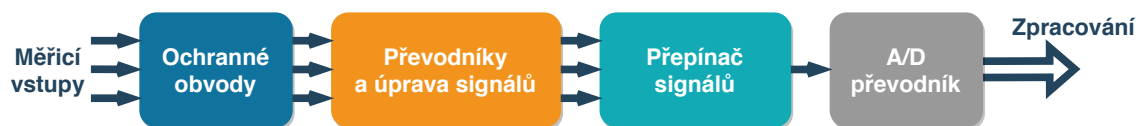
²⁰Universally Unique Identifier - univerzální unikátní identifikační číslo

1.3 Měření elektrických veličin

Měření základních elektrických veličin je nezbytnou součástí nejen oboru elektrotechniky, ale i dalších odvětví lidské činnosti. První měřicí přístroje byly analogové, nejčastěji ručičkové. Jejich princip spočívá v převodu měřené veličiny na veličinu jinou, u které je pak využito určitého fyzikálního jevu, který má za následek vychýlení ručičky o vzdálenost úměrnou velikosti měřené veličiny. Tu pak lze odečíst na stupnici, která bývá ocejchována právě jednotkami této veličiny. Výhodou těchto měřicích přístrojů je především jejich jednoduchost. Zpravidla také nepotřebují žádné napájení, protože energii odebírají přímo z měřeného obvodu. To je však i nevýhodou, protože je tímto obvod ovlivněn a vzniká tak chyba měření.

S rozvojem číslicové techniky začaly vznikat digitální měřicí přístroje, které ve většině případů ty analogové nahradily. Není to však pravidlem, protože v některých nenáročných případech jsou nadále využívány přístroje ručičkové, a to právě díky jejich jednoduchosti a absenci nutnosti napájení.

U číslicových měřicích přístrojů jsou měřené veličiny převáděny na signály napětí různými převodníky a upraveny dalšími analogovými obvody. Ty je pak již možné pomocí analogově digitálního převodníku (ADC) převést do číslicové podoby, libovolně zpracovat a interpretovat. Zjednodušené blokové schéma vstupní části digitálních měřicích přístrojů je uvedeno v obrázku 1.9.



Obr. 1.9: Blokové schéma převodu vstupních signálů v digitálním měřicím přístroji

1.3.1 Bezpečnost u číslicových měřicích přístrojích

Bezpečnost u měřicích přístrojů se dá rozdělit na tři základní kategorie:

- ochrana zařízení vůči ESD²¹,
- proti příliš vysokým hodnotám vstupních veličin,
- ochrana uživatele před zásahem elektrickým proudem.

Elektronické součástky mohou být citlivé na elektrostatické výboje. Nejzranitelnějšími jsou polovodičové, především unipolární. Součástí moderních integrovaných obvodů bývají ochranné diody, které mají za úkol případné výboje potlačit. Při návrhu zařízení je však výhodné se na tuto ochranu nespoléhat, protože existuje šance na jejich selhání. V takovém případě dojde ke zničení integrovaného obvodu,

²¹Electrostatic discharge - elektrostatický výboj

nebo jeho části. Do zařízení je tedy vhodné umístit samostatné TVS²² diody (transily) do uzlů, u kterých se předpokládá, že k výboji může dojít. Jejich princip spočívá v omezení napětí po průraznou hodnotu. Při jejím překročení začne transil vést elektrický proud, čímž toto přepětí omezí (zajistí úbytek napětí na vnitřním odporu zdroje). Bývají konstruovány tak, aby dokázaly snést velké špičkové výkony právě kvůli ESD. Pokud není výboj příliš silný, je jeho funkce zachována. Vhodně umístěný transil může sloužit také jako ochrana proti příliš vysoké hodnotě měřeného napětí. U vstupů pro měření proudu se dále používají rychlé tavné pojistky, které obvod přeruší, aby nedošlo k poškození měřicího přístroje.

Důležitá je také ochrana uživatele před zásahem elektrickým proudem. I při styku pouze s izolovanými částmi obvodu (měřicí vodiče, sondy atd.) existuje nebezpečí elektrického průrazu izolace. K tomu může dojít buď zvolením vodičů s nesprávnou tloušťkou izolace, nebo například při blízkém úderu blesku do venkovního elektrického vedení, ze kterého je měřený obvod napájen. Vzhledem k tomuto definuje ČSN²³ 33 0420 čtyři kategorie (v praxi obvykle značené CAT I – IV), podle místa měření. První kategorie představuje nejméně nebezpečná místa (slaboproudá zařízení) a naproti tomu čtvrtá kategorie venkovní přívod rozvodné sítě do budovy[28]. Měřicí přístroje a prvky na sobě zpravidla mívají uvedeny hodnoty nejvyšších povolených měřených napětí podle daných kategorií. Příklad takového označení na multimetru Mastech MY68 a měřicím vodiči je na obrázku 1.10.



Obr. 1.10: Příklad označení maximálních napětí multimetru

²²Transient voltage suppression - potlačení přechodového jevu

²³Česká technická norma

1.3.2 Operační zesilovače

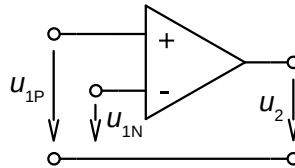
Operační zesilovače (OZ) jsou nejčastější aktivní součástkou pro úpravu elektrických signálů. V závislosti na obvodovém zapojení mohou analogově provádět různé signálové operace (zesílení, sčítání více signálů, absolutní hodnotu, apod.).

Ideální model OZ obsahuje dva vstupy a jeden výstup, jak lze vidět na jeho schematické značce (obr. 1.11). Matematicky ho lze popsat vztahem (1.1),

$$u_2 = A \cdot (u_{1P} - u_{1N}) \quad (1.1)$$

kde A je jeho zesílení. Dále má ideální OZ definovány následující základní vlastnosti:

- má nekonečně velké zesílení ($A = \infty$),
- výstupní napětí může dosahovat nekonečné velikosti (případně maximálně definovaných hodnot),
- má nekonečně velký vstupní odpor ($R_{vst} = \infty$),
- nulový výstupní odpor ($R_{výst} = 0$),
- nulové offsetové napětí ($u_{1P} = u_{1N} \Leftrightarrow u_2 = 0$)
- je frekvenčně nezávislý
- a je nezávislý na okolním prostředí (teplota).



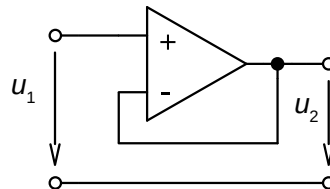
Obr. 1.11: Schematická značka ideálního OZ

Skutečné OZ sice tyto vlastnosti nemají, ale se současnými technologiemi dosahují velice dobrých parametrů pro realizaci přesných obvodů. Je však vždy nutno uvážit, které parametry jsou pro danou aplikaci nejdůležitější, protože konkrétní typy OZ se liší především ve vyvážení jejich vlastností. Například bipolární provedení mají lepší vlastnosti pro vyšší kmitočty oproti unipolárním, avšak na úkor menšího vstupního odporu.

Praktických zapojení s OZ existuje velké množství. V následující části této kapitoly jsou popsána některá základní, která se využívají v měřicích obvodech.

Napěťový sledovač

Nejjednodušším zapojením s OZ je napěťový sledovač, jehož schéma lze vidět na obrázku 1.12. Jak vyplývá z jeho názvu, jedná se o zapojení, kdy výstupní napětí obvodu kopíruje vstup. Obvykle je využíván pro impedanční oddělení, protože jeho vstup téměř vůbec nezatíží obvod zdroje signálu. Matematicky lze chování obvodu popsat vztahem (1.2).

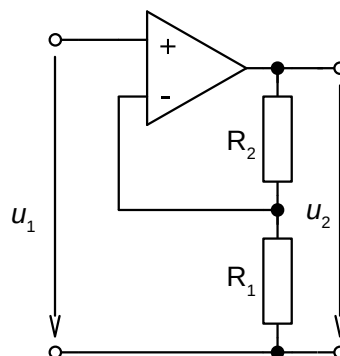


Obr. 1.12: Schéma napěťového sledovače

$$u_2 = u_1 \quad (1.2)$$

Neinvertující zesilovač

Dalším základním zapojením je neinvertující zesilovač, který je zobrazen na obrázku 1.13. Jeho funkce je téměř totožná s napěťovým sledovačem, rozdílem je možnost nastavení zesílení pomocí odporů R_1 a R_2 .



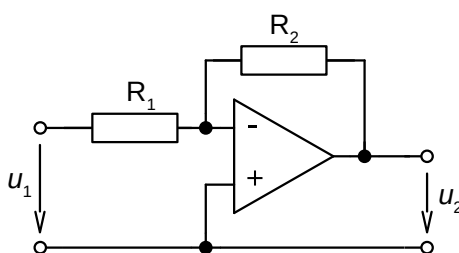
Obr. 1.13: Schéma neinvertujícího zesilovače

S pomocí Kirchhoffových zákonů, Ohmovým zákonem a znalostmi vlastností OZ lze dojít ke vztahu (1.3), ze kterého je patrné, že zesílení tohoto obvodu nemůže být menší než jedna.

$$u_2 = u_1 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (1.3)$$

Invertující zesilovač

Obdobně lze vstupní signál přivést také na invertující vstup zesilovače, což lze vidět na obrázku 1.14. Protože je však nutné dodržet zapojení záporné zpětné vazby, ovlivňují odpory R_1 a R_2 nejen velikost zesílení (viz vztah 1.4), které je dáno jejich poměrem, ale také vstupní odpor celého obvodu (1.5).



Obr. 1.14: Schéma invertujícího zesilovače

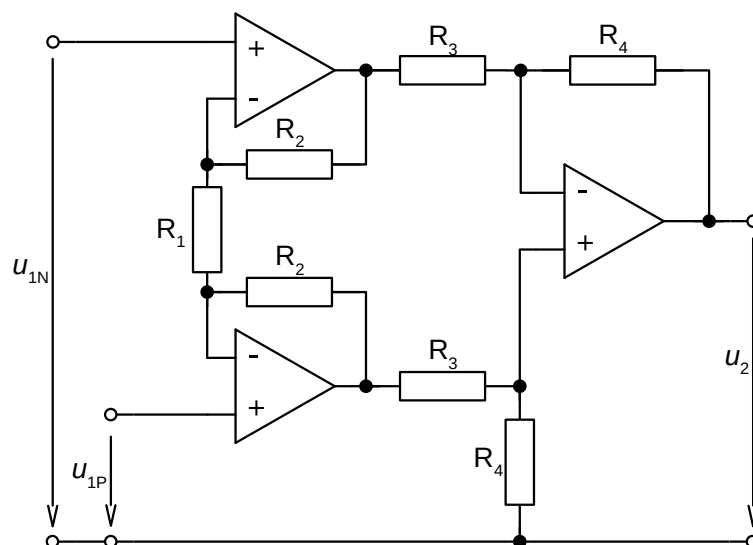
$$u_2 = u_1 \cdot \left(-\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (1.4)$$

$$R_{\text{vst}} = R_1 \quad (1.5)$$

Přístrojový zesilovač

Velice často využívaným zapojením je tzv. přístrojový zesilovač. Dokáže zesilovat rozdíl obou vstupních napětí, přičemž ideálně nezatěžuje ani jedno z nich. Další výhodou je možnost snadné změny celkového zesílení obvodu změnou hodnoty odporu R_1 . Dále je také zesílení dáno hodnotami R_2 , R_3 a R_4 , viz vztah (1.6). V praxi je výhodné celkové zesílení rozložit mezi oba stupně obvodu, čímž se dosáhne největší pracovní kmitočtové šířky pásma a relativně vysoké citlivosti. Tyto vlastnosti ho předurčují jako téměř ideální zesilovač pro měření malých signálů.

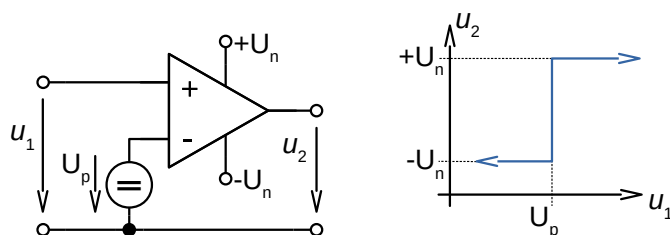
$$u_2 = (u_{1P} - u_{1N}) \cdot \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{R_4}{R_3} \quad (1.6)$$



Obr. 1.15: Schéma přístrojového zesilovače, vzor [29]

Komparátor

OZ lze využít také jako napěťový komparátor díky veliké strmosti jeho převodní charakteristiky. Obě výstupní napěťové úrovně jsou dány jeho napájením a překlápěcí úroveň napětím na jednom ze vstupů. Druhý vstup je připojen ke zdroji signálu. Na obrázku 1.16 je uvedeno zapojení neinvertující a jeho převodní charakteristika. Je však možné vstupy zaměnit, čímž dojde ke změně na zapojení invertující. V obou případech lze chování obvodu považovat za nejjednodušší jednobitový analogově digitální převodník.



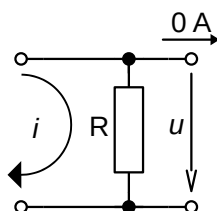
Obr. 1.16: Schéma neinvertujícího komparátoru (vlevo) a jeho převodní charakteristika (vpravo)

1.3.3 Převod proudu na napětí

Pomocí úbytku napětí na odporu

Nejjednodušším převodníkem proudu na napětí je rezistor se známým odporem. Z Ohmova zákona vychází přímá úměrnost mezi těmito veličinami (1.7). Převodní poměr je daný hodnotou odporu R . Schéma tohoto převodníku je na obrázku 1.17. Při jeho návrhu je nutno znát potřebný rozsah měřeného proudu a požadované maximální výstupního napětí. Vnitřní odpor ideálního ampérmetru je nulový, nejlepší je tedy vhodné volit odpor co nejnižší, aby na něm nedocházelo k příliš vysokému úbytku. To s sebou však nese nutnost výstupní napětí více zesilovat, čímž je zesilováno také napětí šumové.

$$u(i) = R \cdot i \quad (1.7)$$



Obr. 1.17: Převod proudu na napětí úbytkem na odporu

Měřicí transformátor proudu

Pokud je kladen nárok na měření vyšších proudů (řádově desítky A a více), jsou k takovému účelu určeny tzv. kleštové multimetry. Název je odvozen z jejich vzhledu. Součástí přístroje jsou čelisti, které slouží k obepnutí kolem vodiče, jímž prochází měřený proud. V tu chvíli se vodič stává primárním vinutím transformátoru, jehož sekundární vinutí je uvnitř multimetru, kde je jeho výstup převeden na napětí. Převodní koeficient transformátoru (1.8) je dán poměry počtů závitů obou vinutí a vychází z něj také vztah mezi velikostmi proudů[30].

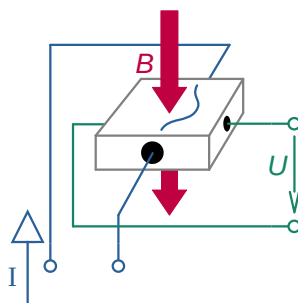
$$K = \frac{n_1}{n_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1.8)$$

Při použití měřicího transformátoru proudu je nutno dbát na to, aby během měření nebyl sekundární obvod přerušen. V případě, že by k tomu došlo, vzrostlo by na sekundárním vinutí napětí na hodnotu, která by mohla poškodit přístroj, či způsobit zranění obsluhy.

Z principu transformátoru také vychází skutečnost, že jeho použití je možné pouze pro měření střídavých proudů, nikoliv stejnosměrných.

Hallova sonda

Některé multimetry mají v kleštvém ústrojí namísto transformátoru Hallovu sondu (viz obrázek 1.18), která využívá silového působení magnetického pole na pohybující se náboj. Prakticky je sonda tvořena destičkou polovodičového materiálu, která obsahuje čtyři elektrody a je umístěna do magnetického pole vytvořeného měřeným proudem. Mezi dvěma elektrodami je veden známý proud. Mezi zbylými dvěma vývody pak vzniká napětí přímo úměrné měřenému proudu.

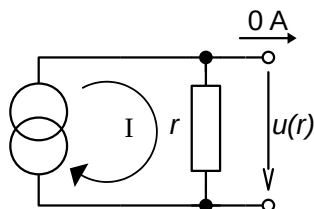


Obr. 1.18: Princip Hallovy sondy, vzor [30]

Výhodou Hallovy sondy oproti měřicímu transformátoru je možnost měření také stejnosměrných proudů.

1.3.4 Převod odporu na napětí

Pro převod odporu na napětí se nejčastěji využívá Ohmova zákona. Pokud je neznámý odpor připojen na známý zdroj konstantního proudu, lze změřením úbytku napětí na tomto odporu dopočítat jeho hodnotu. Obecné schéma takového převodníku je na obrázku 1.19. V praxi používané obvody jsou však velice různé, v závislosti na rozsahu měřených odporů. Některá zapojení jsou více vhodná pro malé hodnoty odporu a jiná pro velké odpory. V digitálních multimetrech je zpravidla mnoho rozsahů, které pak umožňují měřit veliké rozpětí hodnot, čehož jediným jednoduchým obvodem téměř nelze dosáhnout.



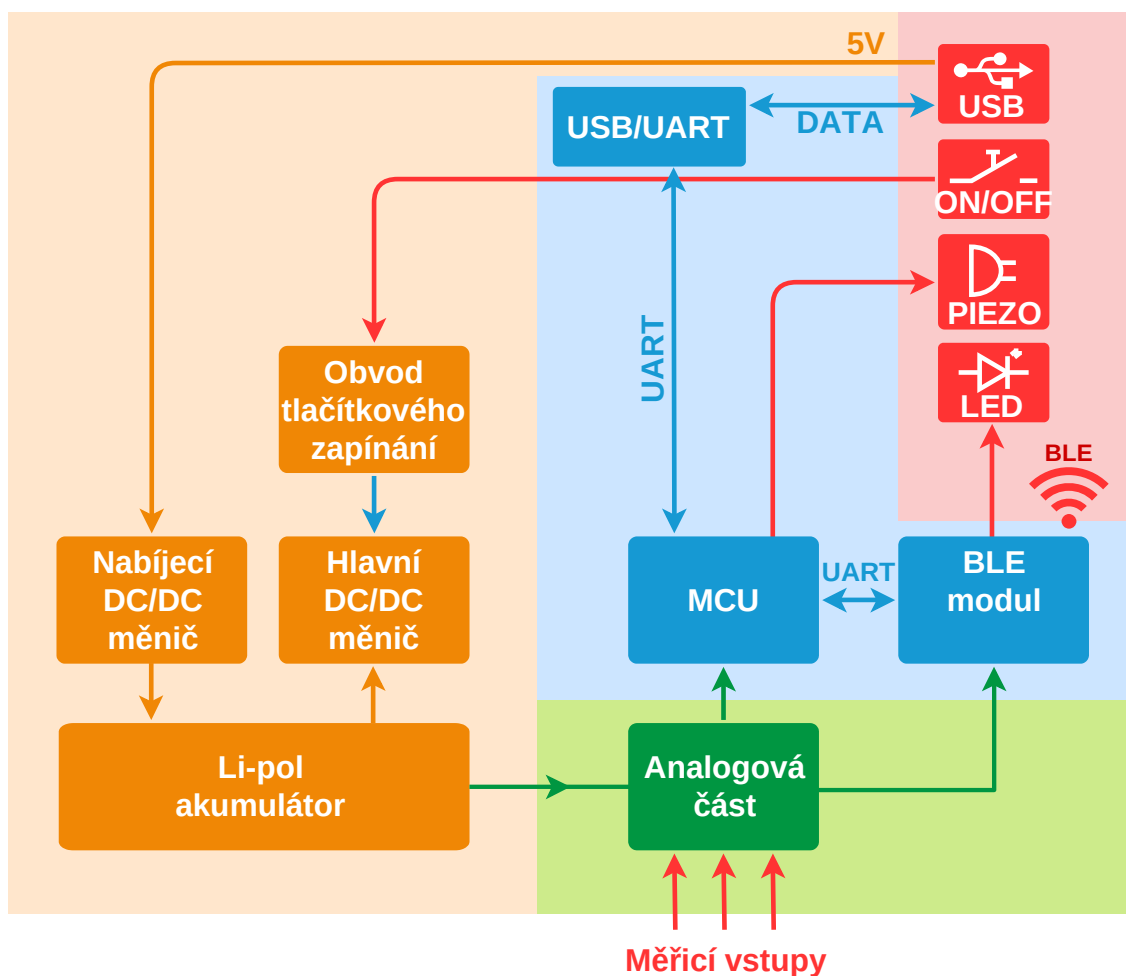
Obr. 1.19: Obecný princip převodu odporu na napětí

2 Praktická část

Následující část této práce shrnuje popis realizace prototypu kompaktního Bluetooth multimetru.

2.1 Schéma zapojení

Prvním bodem návrhu bylo zhotovení blokového schématu. Díky němu lze celé zařízení pomyslně rozdělit na jednodušší dílčí části.



Obr. 2.1: Navržené blokové schéma Bluetooth multimetru

Barevně jsou zde odlišeny následující části:

- červeně jsou ty, se kterými bude v kontaktu uživatel zařízení,
- oranžově je část napájecí,
- modře digitální část zajišťující funkcionalitu,
- zelená část obsahuje analogové obvody k převodu vstupních veličin.

Kompletní schéma zapojení (viz příloha A) bylo vytvořeno programem EAGLE 9.3.0 v bezplatné licenci *educational*, jejíž využití je podmíněno online registrací[8].

2.1.1 Napájecí část

Akumulátor a nabíjecí obvod

Zařízení je navrženo na běh z Li-pol¹ akumulátoru, který je především kompaktnější než 9V baterie, které jsou využívány ve většině běžně dostupných ručních multimetrů. Druhým rozdílem je možnost jeho opětovného nabíjení. U běžně dostupných multimetrů je po vybití baterie nutná její výměna. Vybraný akumulátor od firmy Cellevia disponuje udávanou kapacitou 550 mAh a má integrován ochranný obvod proti přebíjení a podbití.

Pro jeho nabíjení byl zvolen čip MCP73831 od firmy MICROCHIP. V jeho katalogovém listu[9] je uvedeno, že se jedná o obvod zajišťující dobíjení akumulátoru a dodržení správných nabíjecích podmínek. Jednou ze zmíněných výhod, díky které byl tento obvod zvolen, je jednoduchost jeho zapojení, které vyžaduje minimum dalších součástek, takže je výhodný pro použití v různých kompaktních zařízeních. Při návrhu musel být zvolen odpor R_{PROG} (R_2 viz schéma), který určuje hodnotu nabíjecího proudu. Bylo zvoleno 2,4 k Ω , akumulátor je tedy nabíjen proudem, který je možné zjistit pomocí vztahu (2.1) získaného z katalogového listu.

$$I_{\text{REG}} = \frac{1000 \text{ V}}{R_{\text{PROG}}} = \frac{1000 \text{ V}}{2,4 \text{ k}\Omega} \doteq 417 \text{ mA} \quad (2.1)$$

Hlavní napěťový měnič

Napájení téměř celého zařízení je navrženo z měniče TPS63001 od firmy Texas Instruments. Jedná se o integrovaný obvod určený právě pro bateriově napájená zařízení. Jeho vstupní rozsah napětí je dle katalogového listu[10] 1,8 V až 5,5 V. To je dostatečně široký rozsah pro napájení lithiovým akumulátorem. Výstupní napětí je u vybrané verze čipu výrobcem pevně nastaveno na 3,3 V.

Obvod řízení napájení

Posledním integrovaným obvodem napájecí části navrženého zařízení je LTC2950 od výrobce Linear Technology. Tento čip umožňuje zapínat a vypínat zařízení stiskem jediného tlačítka. Po jeho prvním stisku je vyslán signál do povolovacího vstupu napájecího měniče, který se poté spustí. Při dalším stisku tlačítka je celý proces

¹Lithium Polymer - technologie elektronických akumulátorů

obrácen a zařízení se vypne. U tohoto obvodu bylo nutno vypočítat hodnotu kondenzátorů C1 a C2, podle vztahu uvedeného v katalogovém listu[11], které určují reakční doby na stisk zapínacího tlačítka. Výpočet je uveden ve vztahu (2.2)

$$C_{\text{ONT}} = 1,56 \cdot 10^{-4} \cdot (t_{\text{ONT}} - 1) = 1,56 \cdot 10^{-4} \cdot (2116 - 1) \doteq 0,33 \mu\text{F} [\mu\text{F}; \text{ms}] \quad (2.2)$$

Společnou výhodou všech zmíněných integrovaných obvodů byla jejich jednoduchá implementace, protože všechny příslušné katalogové listy obsahují také konkrétní ukázky výrobcem otestovaných zapojení s parametry vhodnými pro použití v této práci. Další výhodou je také velmi malý počet dalších součástek nutných pro funkci těchto obvodů, díky čemuž je dosaženo kompaktnějších rozměrů.

2.1.2 Digitální část

Hlavní mikrokontrolér

Hlavním integrovaným obvodem digitální části je STM32F373 od firmy STMicroelectronics. Jedná se o 32bitový mikrokontrolér s architekturou ARM® Cortex®-M4. Podle katalogového listu[12] obsahuje kromě jednoho 12bitového AD² převodníku také tři 16bitové sigma-delta AD převodníky. Ty poskytnou dostatečné rozlišení pro převody vstupních veličin. Pro následné matematické zpracování získaných dat také tento mikrokontrolér obsahuje FPU³, takže je na něm možné provádět i komplexnější matematické operace s plovoucí desetinnou čárkou.

Aby bylo možné jednoduše připojit multimetr k počítači pomocí USB⁴, bylo zvoleno také použití integrovaného obvodu FT230, který umožní komunikaci pomocí rozhraní UART⁵. Jedná se o náhradu známého čipu FT232 od téže firmy FTDI. Oproti němu je však FT230 menší a obsahuje zabudovaný oscilátor[13].

Komunikační Bluetooth modul

Třetím použitým digitálním obvodem je Bluetooth modul BL652 od firmy Laird. Pomocí něj multimetr komunikuje s chytrým telefonem. Ačkoliv je tento modul nejrozměrnější použitou součástkou, je tato nevýhoda kompenzována mnoha jeho výhodami. První z výhod je, že obsahuje všechny potřebné VF⁶ obvody a konkrétně

²Analog/Digital - označení analogově-digitálního převodníku

³Floating-Point Unit - matematický koprocesor určený pro výpočty aritmetických operací s pohyblivou řádovou čárkou

⁴Universal Serial Bus - univerzální sériová počítačová sběrnice

⁵Universal Asynchronous Receiver-Transmitter - univerzální asynchronní rozhraní

⁶Vysokofrekvenční

verze modulu použitá v této práci disponuje také integrovanou anténou realizovanou přímo na plošném spoji. Na webu výrobce[17] je také uvedena řada certifikací, kterými modul disponuje, je tedy zajištěno, že jeho provoz je v souladu s platnými regulacemi. Z pohledu implementace je však největší výhodou softwarová podpora, kterou výrobce poskytuje. Ta zahrnuje nejen základní firmware s kompletní protokolovou sadou BLE, ale také vlastní proprietární programovací jazyk SmartBASIC včetně API⁷ s rozsáhlou dokumentací a vzorovými zdrojovými kódy[18].

2.1.3 Analogová část

Generátor referenčního napětí

Pro zajištění možnosti měření napětí a proudů obou polarit, je nutno k měřicím obvodům přivést napětovou úroveň rovnu polovině napájecího napětí. Ta byla vytvořena odporovým děličem R12 a R13. Vzhledem k požadavku na malou spotřebu energie, byly hodnoty těchto odporů zvoleny 1 MΩ. K takovému děliči však nelze připojit obvod, který by ho zatížil, protože by došlo ke změně jeho výstupního napětí. Proto k němu byl umístěn operační zesilovač AD8515 v zapojení napětového sledovače, které je uvedeno v jeho katalogovém listu[14].

Měřicí obvod napětí

Díky svým vynikajícím parametrům byl pro zesílení měřeného napětového signálu zvolen integrovaný obvod AD8227. Jedná se o přístrojový zesilovač, jehož použití vyžaduje prakticky pouze jedinou pasivní součástku. Tou je odpor R15, který slouží k nastavení zesílení. V katalogovém listu[15] je uveden vztah (2.3) pro výpočet hodnoty odporu nutné k docílení požadovaného zesílení.

$$R_G = \frac{80\text{k}\Omega}{G - 5} \quad (2.3)$$

Aby bylo dosaženo dostatečného rozlišení, byly zvoleny, s ohledem na použití 16bitového AD převodníku, dva rozsahy. První do ±15 V a druhý do ±60 V. Přepínání rozsahů je vyřešeno polovodičovým přepínačem TS5A3159, který volí hodnotu odporu vstupního napětového děliče a je řízený hlavním mikrokontrolérem. Rozlišovací hodnotu (LSB⁸) lze určit dle vztahu (2.4), ve kterém je uveden příklad výpočtu rozlišení pro rozsah do 60 V.

$$\text{LSB} = \frac{U_{\text{rozsah}}}{2^n} = \frac{120}{2^{16}} = 1,8 \text{ mV} \quad (2.4)$$

⁷Application Programming Interface - sbírka předpřipravených knihoven tvořící softwarové rozhraní pro zjednodušení vývoje aplikací

⁸Least significant bit - nejméně významný bit

Vstupní odpor obvodu je závislý především na hodnotě odporu R18, který je umístěn v sérii s kladným měřicím vstupem. Aby bylo docíleno vstupního odporu multimetru $1\text{ M}\Omega$, byla tato hodnota zvolena na pevno.

Měřicí obvod proudu

Podobně byl navržen i obvod převodníku proudu na napětí. Byla zvolena metoda převodu úbytkem napětí na měřicím odporu, protože tato metoda je nejjednodušší. Vznikající úbytek napětí stačí pouze zesílit. K tomu byl opět využit integrovaný obvod AD8227. V sérii s kladnou vstupní svorkou je zařazena rychlá tavná pojistka, kvůli ochraně proti překročení maximální povolené hodnoty proudu. Velikost měřicího odporu byla zvolena $100\text{ m}\Omega$. Tato hodnota je dostatečně malá, aby bylo možné tento vnitřní odpor multimetru zanedbávat. Pro zvolený rozsah 2 A to však znamená nejvyšší možný úbytek napětí $0,2\text{ V}$. Takové signály ale dokáže přístrojový zesilovač zesílit.

Měřicí obvod odporu

Tato část obvodu byla navržena dle vlastní úvahy. Měření odporů bývá zpravidla řešeno napájením měřeného odporu zdrojem konstantního proudu. Na něm vzniklý úbytek napětí je přímo úměrný jeho velikosti. Multimetry však musí být vybaveny více rozsahy, aby byly schopné měřit celou škálu odporů, od malých po velké.

Hlavní myšlenkou tedy bylo zvětšit dynamický rozsah měření zvolením jiného přístupu k převodu. Měřený odpor je napájen přesným lineárním napěťovým stabilizátorem ADP122 a měřené napětí je získáno z referenčního odporu. Tím je docíleno následujícího převodního vztahu (2.5).

$$u(r) = U_{\text{ref}} \cdot \frac{R_{\text{ref}}}{R_{\text{ref}} + r} \quad (2.5)$$

Tato funkce již není lineární, jedná se totiž o hyperbolickou funkci. Její tvar zajišťuje, že pro nižší hodnoty měřeného odporu r má velkou strmost a tedy v této části charakteristiky je dosaženo lepšího rozlišení. Naopak pro větší odpory charakteristika klesá mírněji, a je v ní tedy i horší rozlišení, které však u větších hodnot není nutné. Díky tomu lze jedním měřicím rozsahem měřit širší rozsah hodnot odporu.

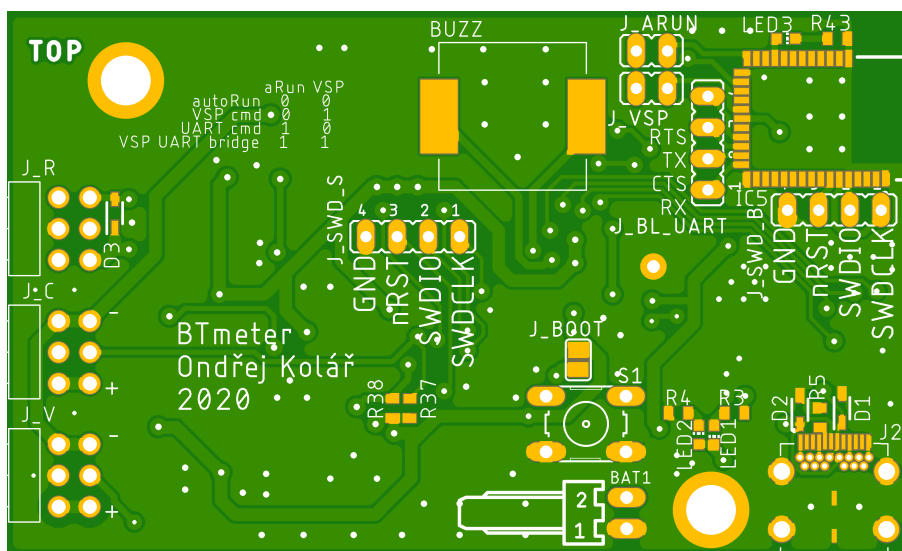
Digitální vstupy

Ze schématu lze vidět, že každý měřicí vstup je fyzicky vyveden jako 6pinový konektor. Krajiní dvojice kolíků jsou vždy spojeny, čímž je zajištěna menší pravděpodobnost špatného dotyku kontaktů, a tím velkého přechodového odporu.

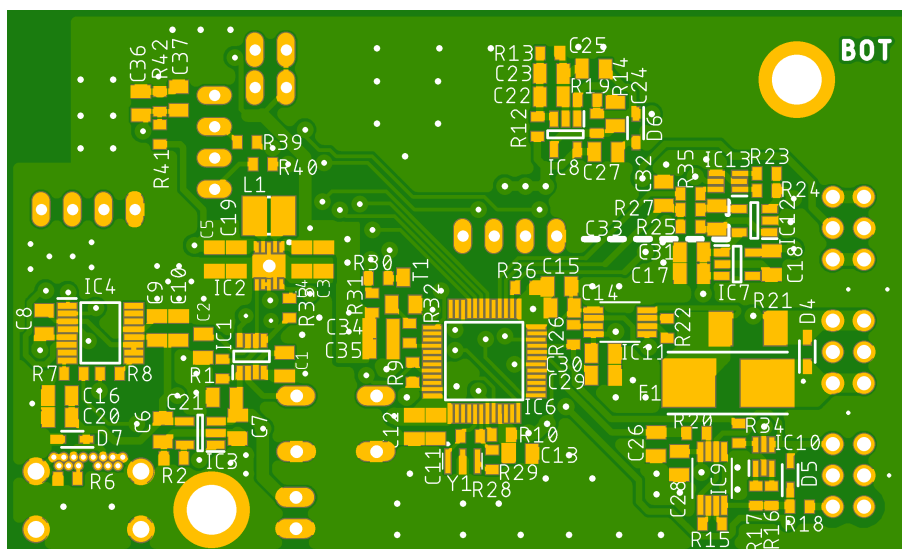
Prostřední piny jsou navrženy jako digitální vstup do hlavního mikrokontroléru a zem. Myšlenkou jejich vyvedení do konektoru je možnost detekce připojení měřících vodičů ke správnému vstupu multimetru. Pokud budou vodiče zkonstruovány právě se šestipinovým konektorem, kdy prostřední dva budou zkratovány, lze jejich připojení detekovat tímto digitálním vstupem a případně upozornit uživatele akustickou signalizací na nesprávné zapojení. V praxi je totiž záměna vstupů multimetru relativně častá, přitom však může mít fatální následky.

2.2 Deska plošných spojů

Po dokončení návrhu zapojení byla navržena také deska plošných spojů. Provedení je dvouvrstvé. Velikost desky vyšla přibližně 74 mm na šířku a 45 mm na délku. Parametry pro DRC⁹ byly nastaveny podle výrobce desek Gatema[20]. Poté byla vyexportována výrobní data, PDF předlohy a BOM¹⁰ (viz přílohy B a C). Vizualizace skutečného vzhledu desky je na obrázcích 2.2 a 2.3.



Obr. 2.2: Vizualizace DPS - horní vrstva



Obr. 2.3: Vizualizace DPS - dolní vrstva

⁹Design Rule Check - nástroj pro automatické vyhledávání návrhových chyb v programu EAGLE

¹⁰Bill of Materials - soupiska použitých součástek

2.3 Komunikační protokol

Komunikační protokol byl navržen tak, aby byl snadno implementovatelný a bylo možné ho v případě nutnosti jednoduše pozměnit. Změřená data odesílá mikrokontrolér STM32F373 pomocí UART¹¹ rychlostí 115200 Bd¹² do modulu BL652 v textové podobě. Výhodou převodu dat do textové podoby již v mikrokontroléru je jednoduchost interpretace. To bylo výhodné především při vývoji, protože data jsou takto na první pohled čitelná a je snadné odhalit případnou chybu. Také je možné umístit přímo do řetězce veličinu jednotky. Další výhodou je možnost čtení těchto dat v chytrém telefonu libovolnou aplikací. Nevýhodou je však vyšší náročnost na objem přenesených dat.

Každá UART zpráva začíná rozlišujícím znakem a je ukončena středníkem. Teoretická délka odesílaného řetězce může být různá, omezena je však modulem BL652, kde je omezení dáno programem na maximální délku 20 znaků + 2 režijní. Řetězce delší než tento limit jsou ignorovány.

| Měřená veličina | Rozlišující znak | Příklad odeslaného řetězce |
|----------------------|------------------|----------------------------|
| Stejnoseměrné napětí | U | U147.9 mV; |
| Stejnoseměrný proud | I | I509.7 uA; |
| Stejnoseměrný výkon | P | P23 W; |
| Elektrický odpor | R | R298.36 kOhm; |

Tab. 2.1: Přehled implementovaných veličin do komunikačního protokolu UART

Pro komunikaci pomocí Bluetooth byla vytvořena GATT¹³ služba a v ní charakteristiky korespondující k veličinám uvedeným v tabulce 2.1. Zvolené základní UUID bylo vygenerováno pomocí online generátoru náhodných ID[19].

Pro otestování zkušebnímu programu byl modul BL652 připojen k počítači přes USB/UART převodník a data do něj byla odesílána programem UwTerminalX. Tento program je sériová konzole vytvořená firmou Laird přímo pro použití s jejich BLE moduly. Oproti jiným podobným programům (např. Putty) obsahuje navíc funkce užitečné při vývoji programů právě pro tyto moduly. Na obrázku 2.4 jsou zachycena odeslaná testovací data. Datům předcházeli příkaz pro spuštění testovacího programu.

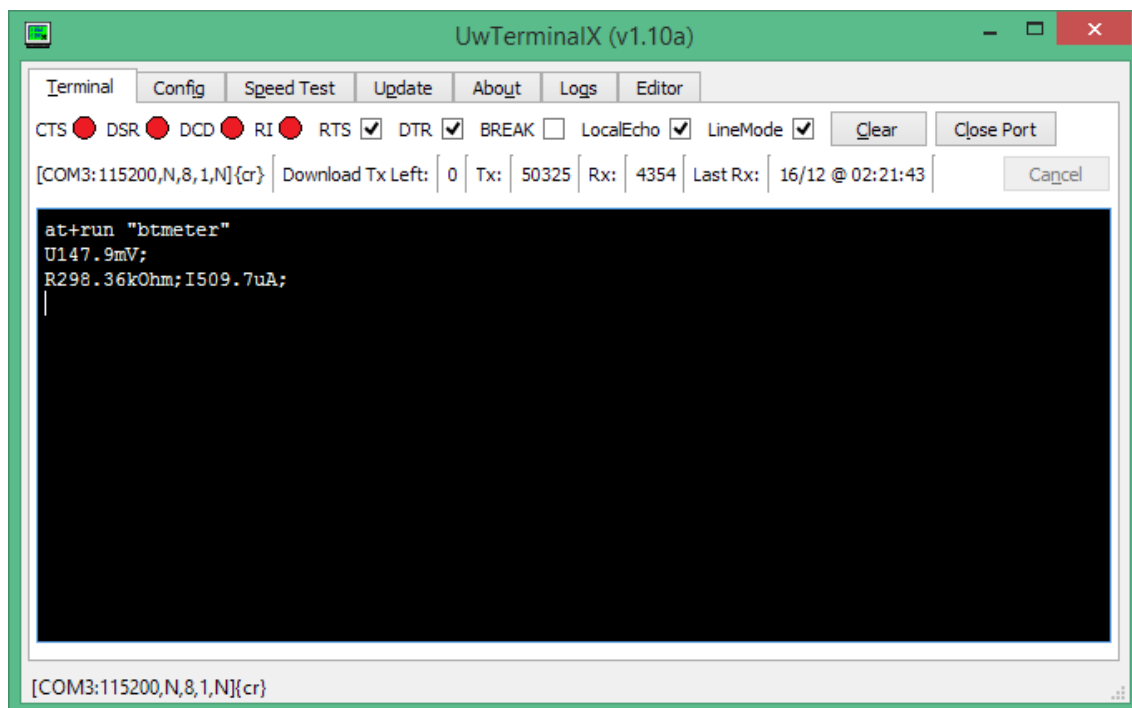
¹¹Universal Asynchronous Receiver-Transmitter - univerzální asynchronní rozhraní

¹²Baud - jednotka přenosové rychlosti

¹³Generic Attribute Profile - viz kapitola 1.2.8

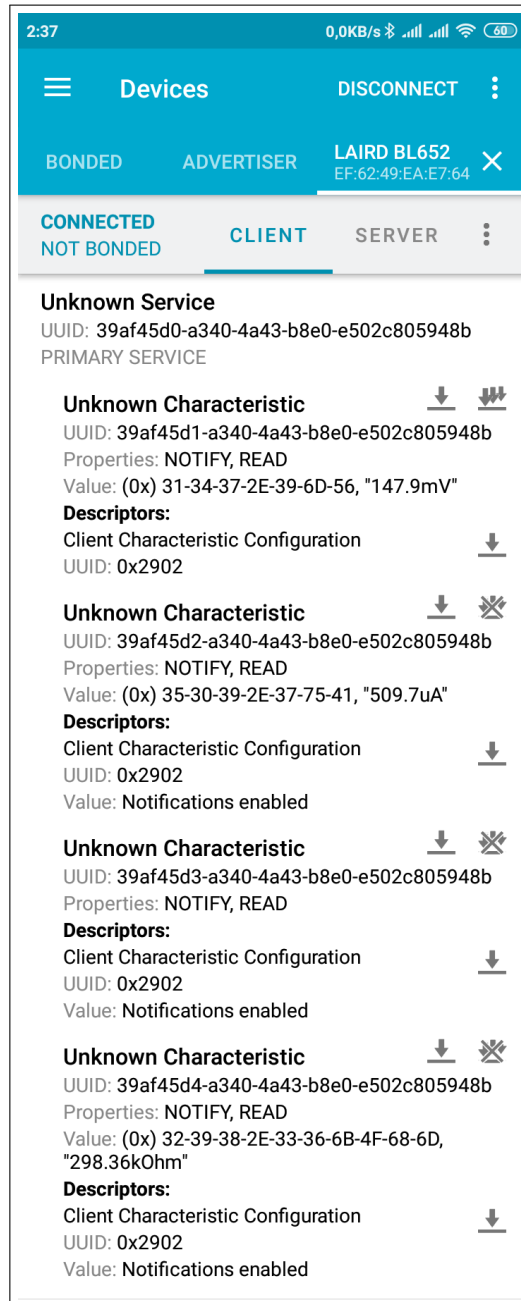
| Služba BTmeter | |
|--|--------------------------------------|
| UUID: 39AF45D0-A340-4A43-B8E0-E502C805948B | |
| Charakteristika | UUID |
| Stejnoseměrné napětí | 39AF45D1-A340-4A43-B8E0-E502C805948B |
| Stejnoseměrný proud | 39AF45D2-A340-4A43-B8E0-E502C805948B |
| Stejnoseměrný výkon | 39AF45D3-A340-4A43-B8E0-E502C805948B |
| Elektrický odpor | 39AF45D4-A340-4A43-B8E0-E502C805948B |
| Napětí baterie multimetru | 39AF45D5-A340-4A43-B8E0-E502C805948B |

Tab. 2.2: Přehled definované GATT služby



Obr. 2.4: Ukázka programu UwTerminalX

K otestování přenosu dat do chytrého telefonu byla využita mobilní aplikace *nRF Connect*, která je dostupná ke stažení na Google Play[21]. Tato aplikace dokáže komunikovat s různými BLE zařízeními na úrovni jednotlivých GATT¹⁴ atributů. Díky tomu lze zjistit jaké služby, charakteristiky dotyčné BLE zařízení poskytuje. Na obrázku 2.5 je aplikace zachycena po přijetí testovacích dat poslaných programem UwTerminalX. Data jsou zobrazována v hexadecimální a textové podobě.



Obr. 2.5: Ukázka mobilní aplikace nRF Connect

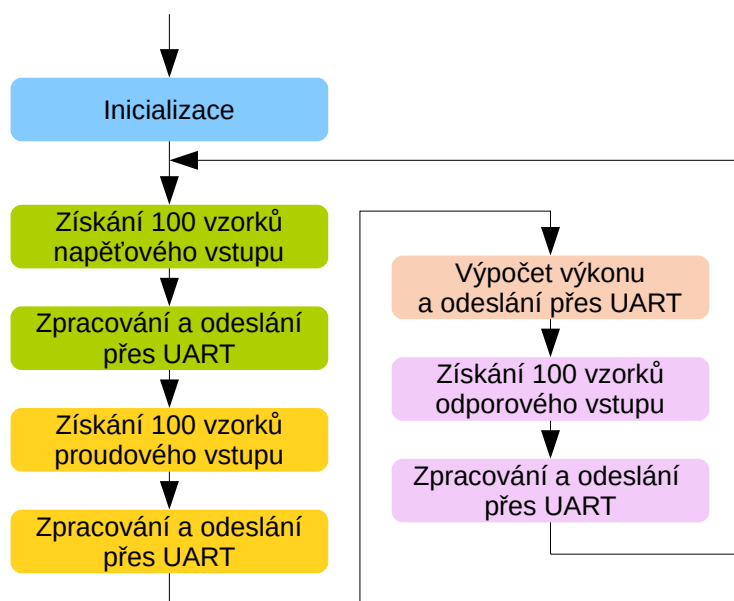
¹⁴Generic Attribute Profile - viz kapitola 1.2.8

2.4 Software multimetru

2.4.1 STM32F373

Program pro hlavní mikrokontrolér byl vytvořen v oficiálním vývojovém prostředí STM32CubeIDE 1.3.1[32] v jazyce C. Bylo využito také integrovaného konfiguračního nástroje STM32CubeMx perspective, který umožňuje jednoduché nastavení periférií mikrokontroléru v grafickém prostředí a potřebný inicializační kód je poté automaticky vygenerován. Program je napsán s využitím knihovny HAL¹⁵, která umožňuje periférie procesoru ovládat voláním jednoduchých funkcí s využitím online dokumentace[22][23].

Program po inicializaci přechází do nekonečné smyčky, ve které vzorkuje pomocí SDADC¹⁶ napětové signály z analogových obvodů všech třech měřících vstupů. Získaná data jsou zpracována, převedena do textové podoby a pomocí UART¹⁷ rozhraní odeslána do Bluetooth modulu a USB¹⁸/UART převodníku pro případné zpracování v počítači. Zjednodušený vývojový diagram programu je na obr. 2.6. Pro zachování přehlednosti do něj byly zahrnuty pouze nejdůležitější bloky programu. Mimo ně program také vyhodnocuje automatickou volbu rozsahu, překročení maximálních hodnot rozsahů a zvukovou indikaci.



Obr. 2.6: Zjednodušený diagram programu mikrokontroléru STM32F373

¹⁵Hardware abstraction layer - vrstva vytvářející jednotné programové rozhraní

¹⁶Sigma-delta analog-to-digital converter - typ analogově digitálního převodníku

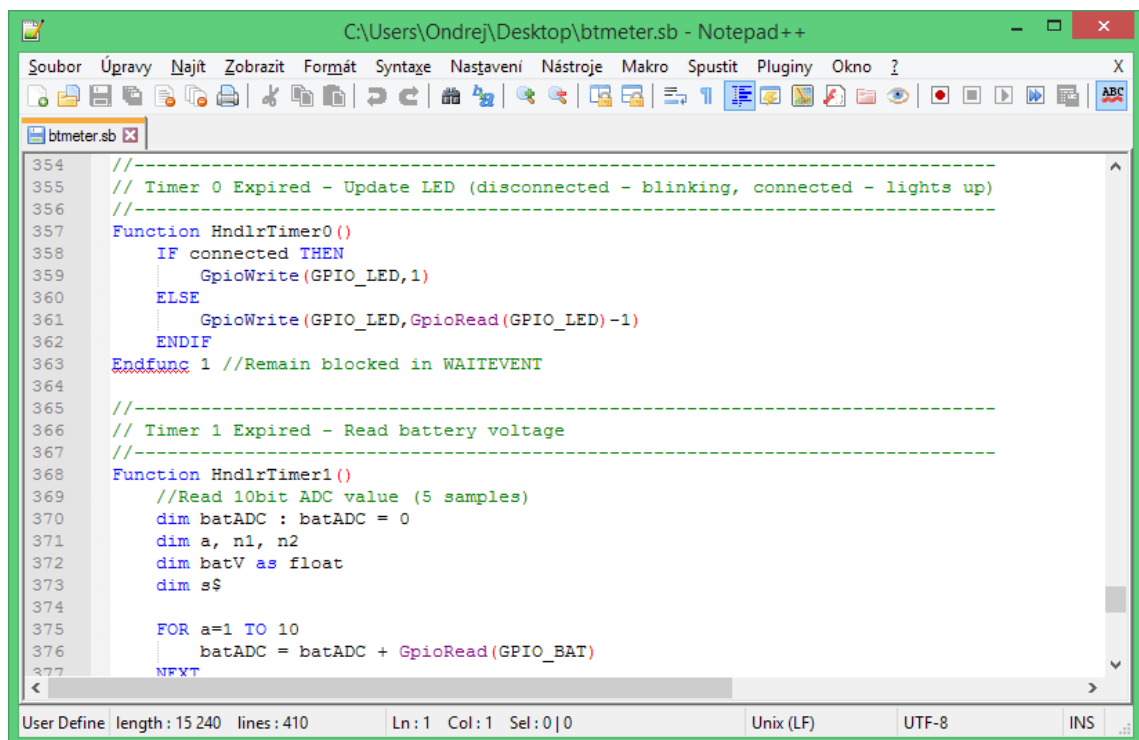
¹⁷Universal Asynchronous Receiver-Transmitter - univerzální asynchronní rozhraní

¹⁸Universal Serial Bus - univerzální sériová počítačová sběrnice

2.4.2 BL652

Pro vývoj softwaru v proprietárním jazyce SmartBASIC pro Bluetooth modul je možné využít libovolného textového editoru. Výhodné je však pracovat v programu Notepad++[24], pro který dodává výrobce modulů Laird soubor s definicí klíčových slov pro zvýraznění syntaxe. Ten lze stáhnout na oficiální produktové stránce[17] v sekci s dokumentací. Ukázka editoru je na obr. 2.7. V této sekci webu jsou dostupné také dokumenty s kompletní dokumentací jazyka SmartBASIC. Ta obsahuje přesný popis všech definovaných funkcí, příklady jejich použití a další potřebné informace pro vývoj.

Vytvořený program je tvořen definicemi konstant, inicializací a obslužnými funkcemi, které jsou volány automaticky při definovaných událostech. Jsou využity dva čítače, první zajišťuje časování blikání stavové diody a druhý obstarává periodické měření napětí akumulátoru. Další obsluhovanou událostí je přijetí dat pomocí rozhraní UART¹⁹. Přijaté znaky jsou jednotlivě předávány funkci, která z těchto zpráv získává data a předává je dále pomocí Bluetooth.

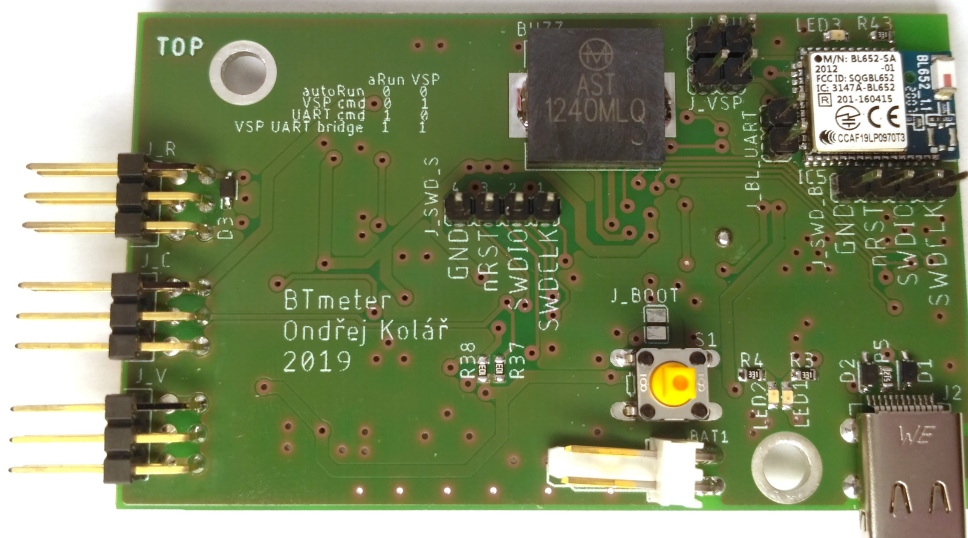


```
354 //-----
355 // Timer 0 Expired - Update LED (disconnected - blinking, connected - lights up)
356 //-----
357 Function HndlrTimer0()
358     IF connected THEN
359         GpioWrite(GPIO_LED,1)
360     ELSE
361         GpioWrite(GPIO_LED,GpioRead(GPIO_LED)-1)
362     ENDIF
363 Endfunc 1 //Remain blocked in WAITEVENT
364
365 //-----
366 // Timer 1 Expired - Read battery voltage
367 //-----
368 Function HndlrTimer1()
369     //Read 10bit ADC value (5 samples)
370     dim batADC : batADC = 0
371     dim a, n1, n2
372     dim batV as float
373     dim s$
374
375     FOR a=1 TO 10
376         batADC = batADC + GpioRead(GPIO_BAT)
377     NEXT
```

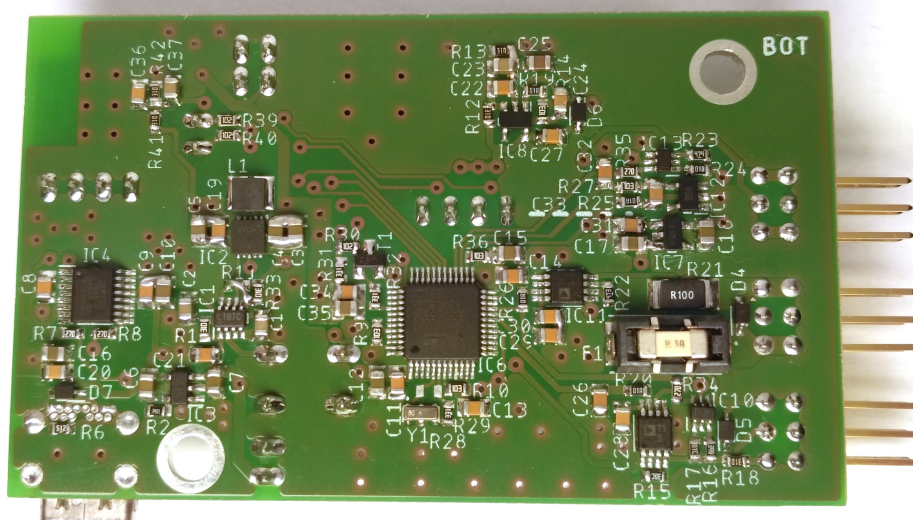
Obr. 2.7: Ukázka textového editoru Notepad++ a kódu v jazyce SmartBASIC

¹⁹Universal Asynchronous Receiver-Transmitter - univerzální asynchronní rozhraní

2.5 Konstrukce multimetru



Obr. 2.8: Fotografie osazeného multimetru - horní strana



Obr. 2.9: Fotografie osazeného multimetru - spodní strana

2.5.1 Oživení

Po dokončení prvních verzí softwaru bylo zkonstruováno navržené zařízení. Při ručním osazování plošného spoje bylo postupováno systematicky po jednotlivých funkčních blocích. První byly oživeny napájecí obvody, aby mohla být otestována správná funkčnost, bez rizika zničení součástek dalších částí zařízení, v případě jejich selhání. Dále byly oživeny analogové obvody. Poté bylo možné rychlým prvotním měřením ověřit, zda jsou na jejich výstupech očekávané hodnoty napětí. Následovalo osazení a vyzkoušení funkčnosti digitálních obvodů. Na závěr pak byly osazeny konektory, pinové lišty a zbývající součástky.

V průběhu celého oživování se bylo objeveno pouze několik drobných chyb, které bylo možné jednoduše opravit. První chybou byla nesprávná logická úroveň přivedená na povolovací vstup lineárního stabilizátoru (ve schématu IC7), který se tudíž nespustil. Toto bylo možné improvizovaně obejít odpájením vývodu integrovaného obvodu od desky plošných spojů a jeho následným připájením ke kontaktu sousedícího kondenzátoru, jež je součástí správného uzlu.

Další chybou se ukázalo být nevyvedení signálů RTS²⁰ a CTS²¹ modulu BL652 (ve schématu IC5) na pinovou lištu. Tyto signály jsou nezbytné pro aktualizaci firmwaru v modulu. K provedení tohoto úkonu byly tedy signály dočasně vyvedeny připájením provizorních vodičů, které byly následně odstraněny.

Poslední chybou v návrhu byly zapomenuté propoje řídicích signálů mezi mikrokontrolérem (ve schématu IC6) a kontrolérem tlačítka napájení (IC1). Ty slouží pro vyvolání přerušení v programu, aby mohl procesor dokončit nutné operace a poté zpětně informovat kontrolér tlačítka, že je již možné bezpečně vypnout napájení. V současné aplikaci však mikrokontrolér, ani Bluetooth modul nemají v programu funkce, které by mohly v případě náhlého výpadku napájení způsobit chybu (např. nedokončení zápisu do nevolatilní paměti). Bylo tedy možné tyto signály vzájemně propojit (opět improvizovanou vzdušným propojem) pouze v rámci kontroléru tlačítka, který díky tomu při požadavku na vypnutí po stisku tlačítka nečeká na potvrzení a rovnou zařízení vypne.

Všechny výše zmíněné chyby byly zpětně opraveny v návrhu schématu a desky plošných spojů. V přílohách jsou tedy již opravené verze, aby odpovídaly současnému fyzickému zapojení. Fotografie zkonstruovaného zařízení jsou v obrázcích 2.8 a 2.9.

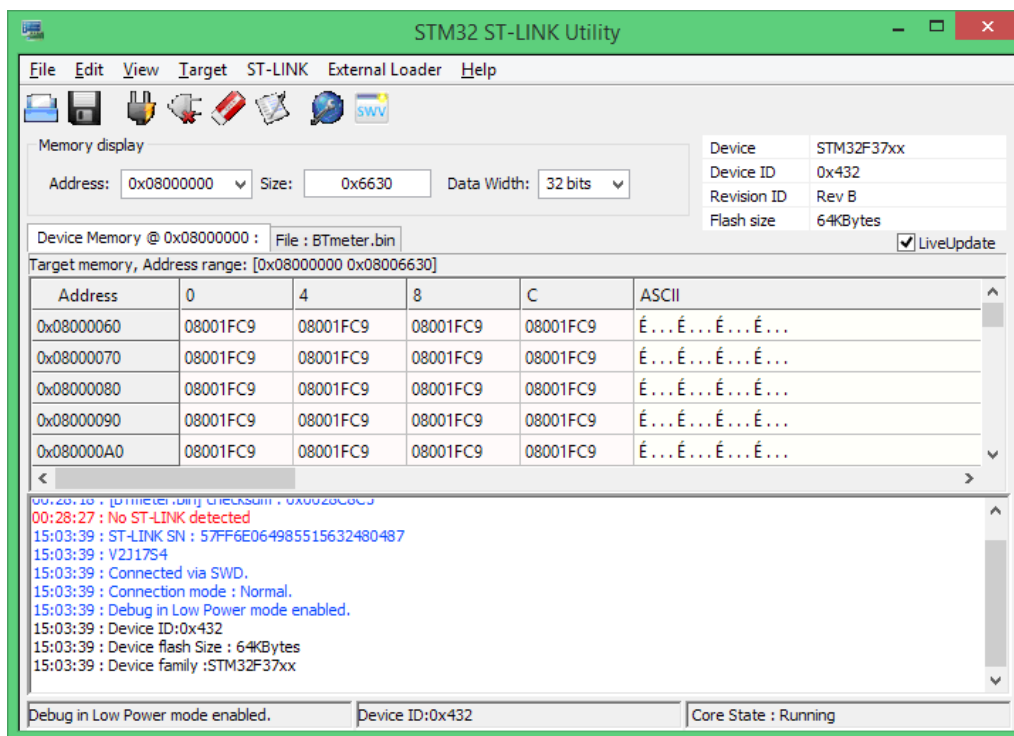
²⁰Request to send - výstupní řídicí signál rozhraní UART

²¹Clear to send - vstupní řídicí signál rozhraní UART

Programování mikrokontrolérů

V rámci ožívování bylo také nutno nahrát do paměti mikrokontrolérů příslušné zkompilevané programy (viz sekce 2.4). K tomu jsou nutné různé softwarové a hardwarové prostředky.

Pro naprogramování mikrokontroléru STM32F373 byl použit USB²² programátor ST-Link V2 a počítačová aplikace STM32 ST-LINK Utility (viz obr. 2.10). Použití těchto nástrojů umožňuje nahrání binárního kódu, ladit chod mikrokontroléru a sledovat v reálném čase jeho stav a paměť.



Obr. 2.10: Ukázka programu STM32 ST-LINK Utility

U modulu BL652 bylo nutné nejprve aktualizovat jeho firmware, a teprve poté nahrát program. K oběma úkonům lze použít libovolný USB/UART²³ převodník, který pracuje s napětovou úrovní 3,3 V a má vyvedeny signály RTS²⁴ a CTS²⁵. Veškerý potřebný software je dostupný ze stránek výrobce[17] v sekci s dokumentací. Součástí staženého archivu je aplikace *BL65xUartFwUpgrade.exe*, která provede aktualizaci, binární soubor nového firmwaru, ale také kompilátor pro uživatelský program v jazyce SmartBASIC. Zdrojové soubory tohoto jazyka končí obvykle příponou *.sb* a po jejich kompilaci vznikají soubory s koncovkou *.uwc*. Zkompilevaný program

²²Universal Serial Bus - univerzální sériová počítačová sběrnice

²³Universal Asynchronous Receiver-Transmitter - univerzální asynchronní rozhraní

²⁴Request to send - výstupní řídicí signál rozhraní UART

²⁵Clear to send - vstupní řídicí signál rozhraní UART

je pak možné nahrát do modulu jeho přetažením myši do okna aplikace UwTerminalX, která již byla zmíněna v [sekci 2.3](#). Modul v tu chvíli musí být tzv. interaktivním módu, ve kterém lze modul ovládat pomocí příkazů. Po úspěšném přenosu setrvává modul v interaktivním režimu. Nahráný program je možné spustit příkazem *AT+RUN "jmenoProgramu"*.

2.6 Kalibrace a kontrolní měření

K veškerým měřením a kalibracím popsaným v této kapitole bylo využito digitálního multimetru Mastech MY68, jehož přesnost se pohybuje okolo 1 %. Napájecím zdrojem při měření napětí a proudu byl regulovatelný zdroj od firmy Metra Blansko. Tento zdroj je tvořen pouze transformátorem s proměnným počtem závitů sekundárního vinutí, selenovým usměrňovacím můstkem a filtračním elektrolytickým kondenzátorem. Protože neobsahuje žádnou formu stabilizace, kolísá jeho výstupní napětí v závislosti na výkyvech rozvodné sítě.

Jako první byl ověřen klidový proud odebíraný z akumulátoru při vypnutém multimetru. Jeho hodnota činí přibližně $14 \mu\text{A}$. Výpočtem (2.6) vychází, že k vybití multimetru dojde ve vypnutém stavu za dobu více než čtyř let.

$$t_{\text{off}} = \frac{C}{I} = \frac{0,55}{14 \cdot 10^{-6}} \doteq 39\,285,7 \text{ h} = 4,48 \text{ let} \quad (2.6)$$

Obdobně byl zjištěn odběr proudu během aktivního měření. V tomto případě činila jeho velikost přibližně $27,5 \text{ mA}$. Výpočtem (2.7) bylo zjištěno, že multimetr je teoreticky schopen nepřetržitého měření okolo 20 hodin.

$$t_{\text{on}} = \frac{C}{I} = \frac{0,55}{27,5 \cdot 10^{-3}} = 20 \text{ h} \quad (2.7)$$

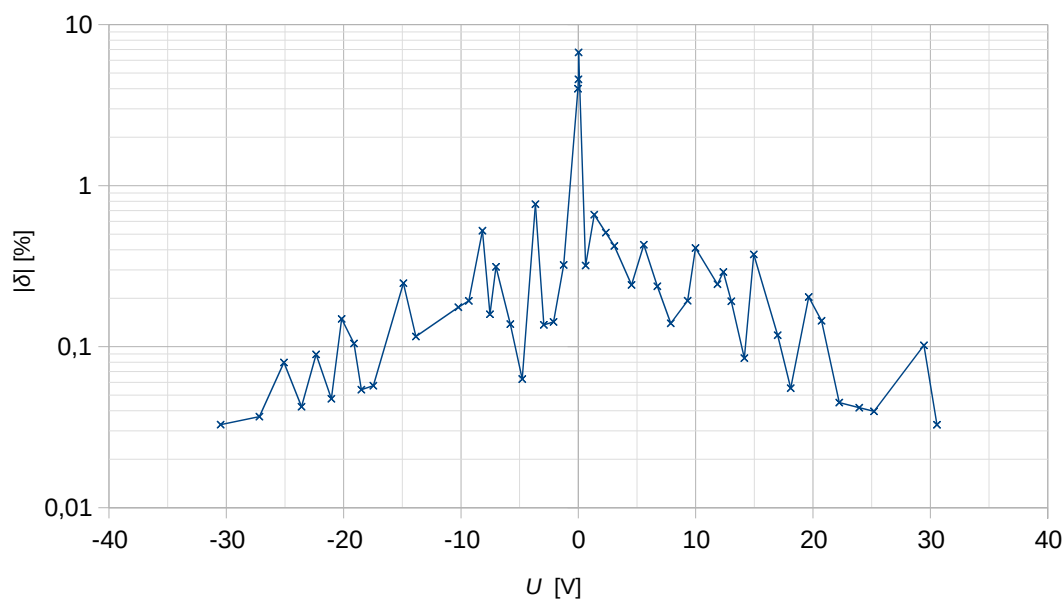
2.6.1 Napěťové rozsahy

Pro základní kalibraci napěťového rozsahu bylo nutno zjistit dvě konstanty, které budou určovat rovnici přímky převodní funkce mezi hodnotou získanou z SDADC²⁶ a hodnotou indikovanou. Nejprve byla získána hodnota odpovídající nulovému měřenému napětí, která je nadále od hodnot ADC odečítána. Tím byla zkalibrována "nula" rozsahu. Dále bylo nastaveno měřené vstupní napětí na známou hodnotu a opět vyčtena surová hodnota po A/D převodu. Podílem těchto dvou hodnot byla získána druhá konstanta určující strmost převodní funkce. Stejným způsobem bylo postupováno i pro druhý napěťový rozsah.

²⁶Sigma-delta analog-to-digital converter - typ analogově digitálního převodníku

Po zadání převodní funkce do programu mikrokontroléru bylo provedeno kontrolní měření, při kterém byl proměřen maximální dostupný rozsah napětí. To bylo prováděno vyrobeným multimetrem a referenčním multimetrem Mastech zároveň. Hodnoty byly následně zadány do počítače a v tabulkovém procesoru vykreslena závislost absolutní relativní odchylky (viz obrázek 2.11), získané vztahem (2.8), na měřeném napětí.

$$|\delta| = \left| \frac{U - U_{\text{ref}}}{U_{\text{ref}}} \right| \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.8)$$

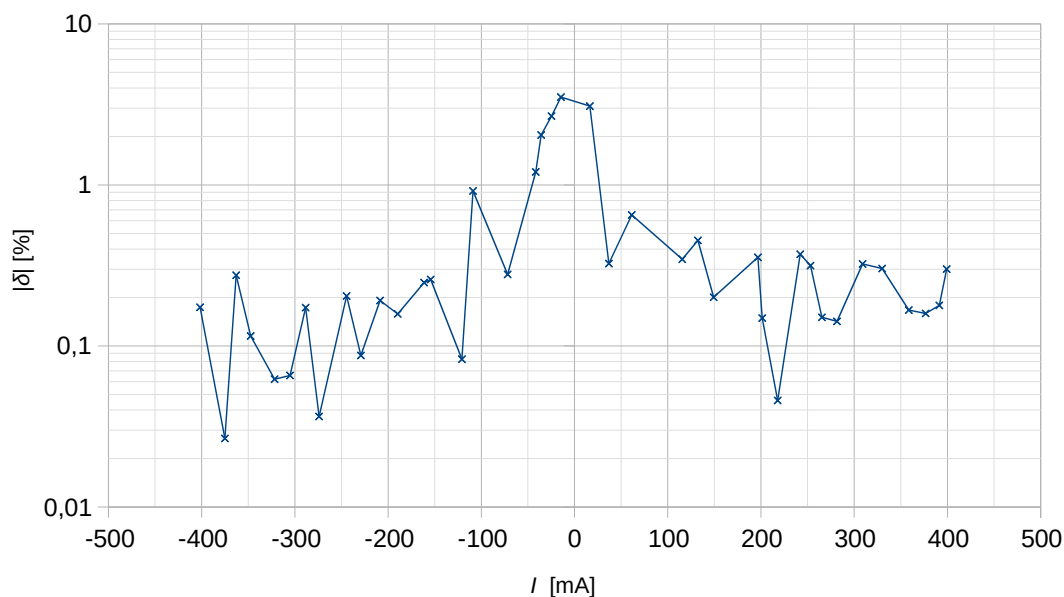


Obr. 2.11: Graf absolutní relativní odchylky měřeného napětí

Z definice relativní odchylky vyplývá, že její hodnota se v nule teoreticky limitně blíží nekonečnu. V jejím okolí je tedy hodnota nevypovídající a mimo něj nepřekračuje 1 %. Dále lze vidět, že graf nemá plynulý průběh. To je zřejmě způsobeno nestálostí napětí měřeného zdroje. Je pravděpodobné, že v laboratorních podmínkách s přesnějšími přístroji by graf dosahoval nižších hodnot. Také je patrné, že s rostoucí hodnotou měřeného napětí odchylka prudce klesá.

2.6.2 Proudový rozsah

Pro kalibraci proudového rozsahu bylo postupováno totožně, jako v případě napětového. Také jeho převod je dán přímkou. Následně byl také proměřen průběh závislosti absolutní relativní odchylky měřeného proudu (obrázek 2.12) v rozsahu hodnot, kterých bylo možno s dostupným vybavením dosáhnout.



Obr. 2.12: Graf absolutní relativní odchylky měřeného proudu

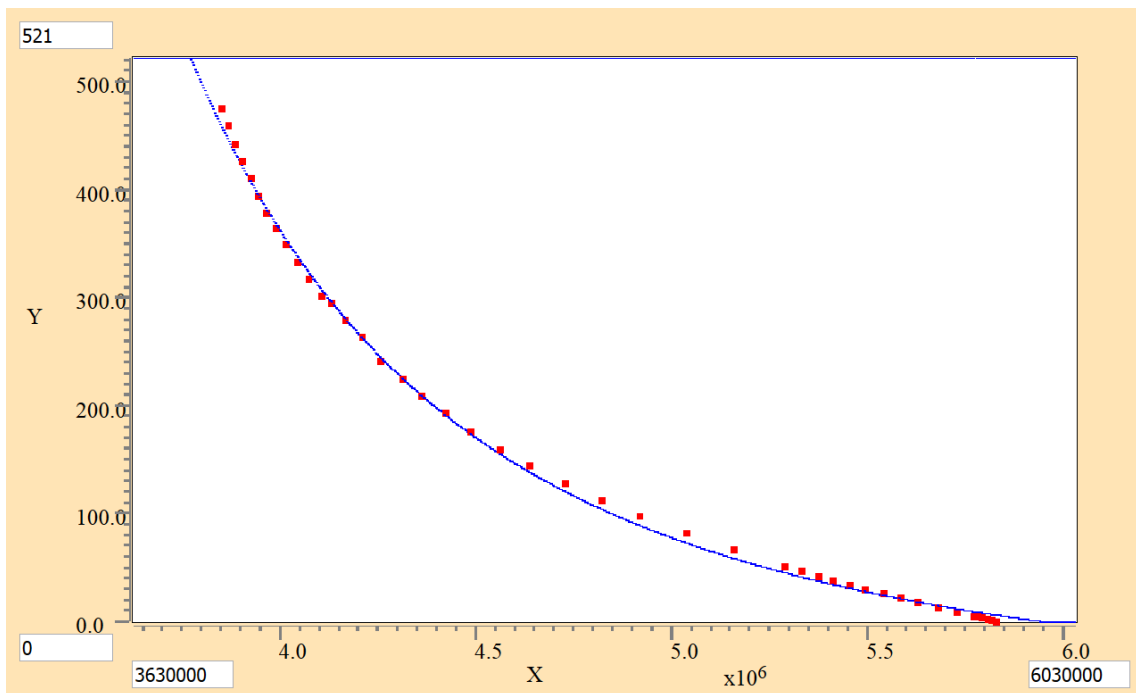
I tento graf ukazuje podobné výsledky, jako graf při měření napětí. S rostoucí velikostí měřené hodnoty odchylka klesá a kromě okolí nulového proudu nepřekračuje 1 %.

2.6.3 Odporové rozsahy

Kalibrace odporových rozsahů se ukázala být náročnější oproti předpokladu. Teoretickou analýzou, použitého měřicího obvodu pro převod odporu na napětí, vyšla převodní charakteristika jako hyperbolická funkce, a tedy pro zpětný početní převod v mikrokontroléru by měla být použita funkce inverzní, což je v případě hyperboly taktéž hyperbola. Při prvotních pokusech o kalibraci byly však přepočtené měřené hodnoty příliš odlišné od těch skutečných. Proto bylo využito webové aplikace NLSCF[33], pro určení aproximační funkce ze získaných hodnot A/D převodníku a odpovídajících proměřovaných odporů. S využitím tohoto programu bylo zjištěno, že získaným bodům nejlépe odpovídá funkce (2.9).

$$y(x) = A \cdot \exp\left(\frac{B}{x}\right) + C \quad (2.9)$$

Ani ta však neprochází dokonale všemi body, jak lze vidět na obrázku 2.13.



Obr. 2.13: Snímek z webové aplikace pro zjišťování aproximačních funkcí

Měření odporu je tedy v současné chvíli zatíženo touto chybou, která bude odstraněna implementací dodatečné korekční funkce.

2.7 Mobilní aplikace

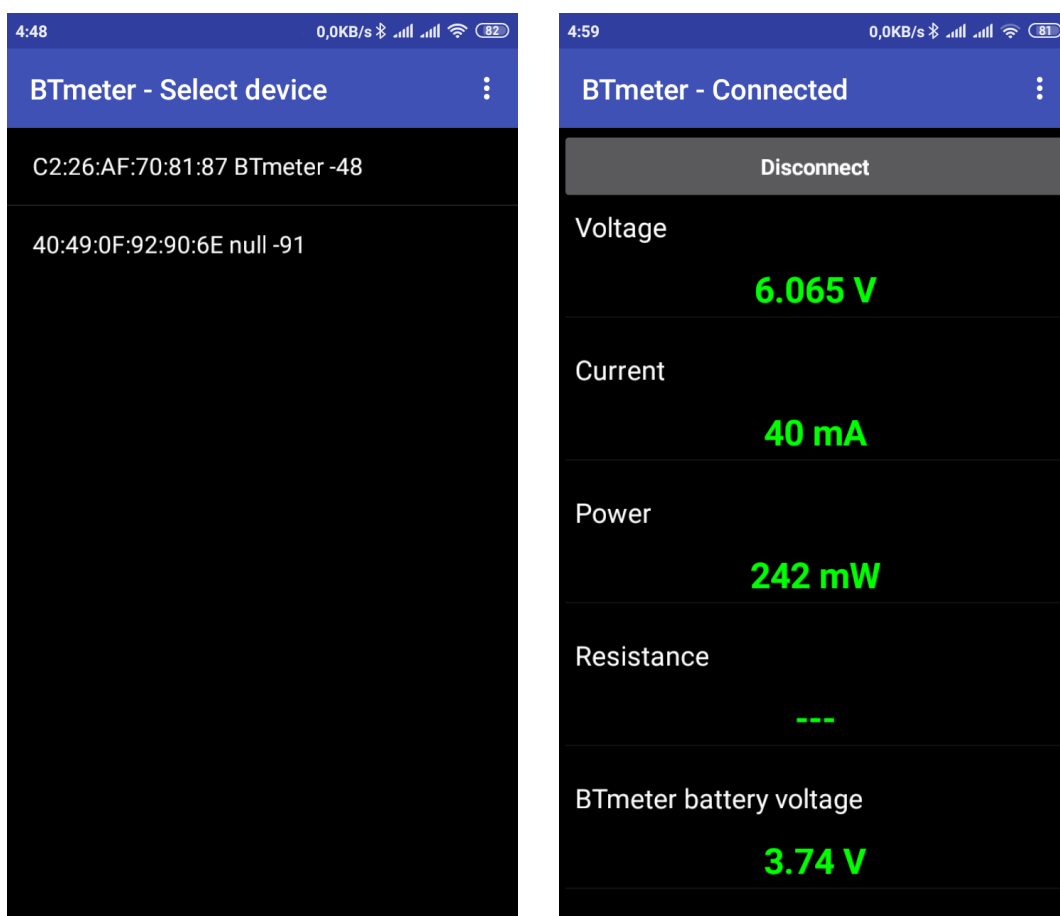
Vzhledem k jednoduchosti požadované mobilní aplikace (pouhé zobrazení přijatých dat), nebylo zapotřebí využít vývojové prostředí Android Studio, které je běžně využíváno k tvorbě aplikací v jazyce Java. Místo něj byla aplikace vytvořena v online vývojovém prostředí MIT AppInventor 2[25]. V něm je možné vytvořit velice rychle jednoduché až středně složité aplikace, i bez hlubší znalosti programování pro operační systém Android.

Tvorbu aplikace lze rozdělit do dvou základních částí. Nejprve je nutné v záložce Designer navrhnout grafickou stránku aplikace. Do náhledu obrazovky mobilního telefonu lze libovolně rozmístit požadované komponenty (textové pole, tlačítko, atd.) a nastavit jim požadované parametry. Druhou částí je grafické programování samotné logiky aplikace v záložce Blocks. Zde se nachází volná plocha, do které je možné z nabídky sestavit jednu či více řetězců bloků, které odpovídají jednotlivým příkazům. MIT AppInventor však v základu nemá komponentu pro obsluhování BLE²⁷, je ji však možné vložit do projektu jako rozšíření. Lze ji stáhnout na webové

²⁷Bluetooth Low Energy - moderní bezdrátová technologie

stránce s její dokumentací[26].

Program vytvořené aplikace BTmeter je v příloze D. Grafická stránka byla navržena co nejjednodušší pro snadnou přehlednost. Po spuštění aplikace se zobrazí seznam všech BLE zařízení v dosahu a uživatel stiskem příslušného řádku seznamu zahájí připojení. Pokud se aplikaci podaří navázat spojení, je ještě zkontrolováno, zda dotyčné zařízení obsahuje požadovanou službu multimetru. Pokud ano, zobrazí se na obrazovce ukazatele měřených veličin s aktuálními hodnotami. V opačném případě se aplikace sama odpojí a dále vyhledává dostupná zařízení. Ukázka její funkce je na obrázku 2.14.



(a) Seznam zařízení v dosahu

(b) Probíhající měření výkonu

Obr. 2.14: Snímky obrazovky aplikace BTmeter

2.8 Popis uživatelského rozhraní a parametrů multimetru

Multimetr provádí současné měření stejnosměrného napětí, proudu a odporu. Pro každou veličinu je určen příslušný měřicí vstup. K dispozici jsou následující rozsahy:

- ± 15 V DC a ± 60 V DC s automatickou volbou rozsahu,
- ± 2 A DC,
- $10 \Omega - 15 \text{ k}\Omega$ a $15 \text{ k}\Omega - 1 \text{ M}\Omega$ s automatickou volbou rozsahu.

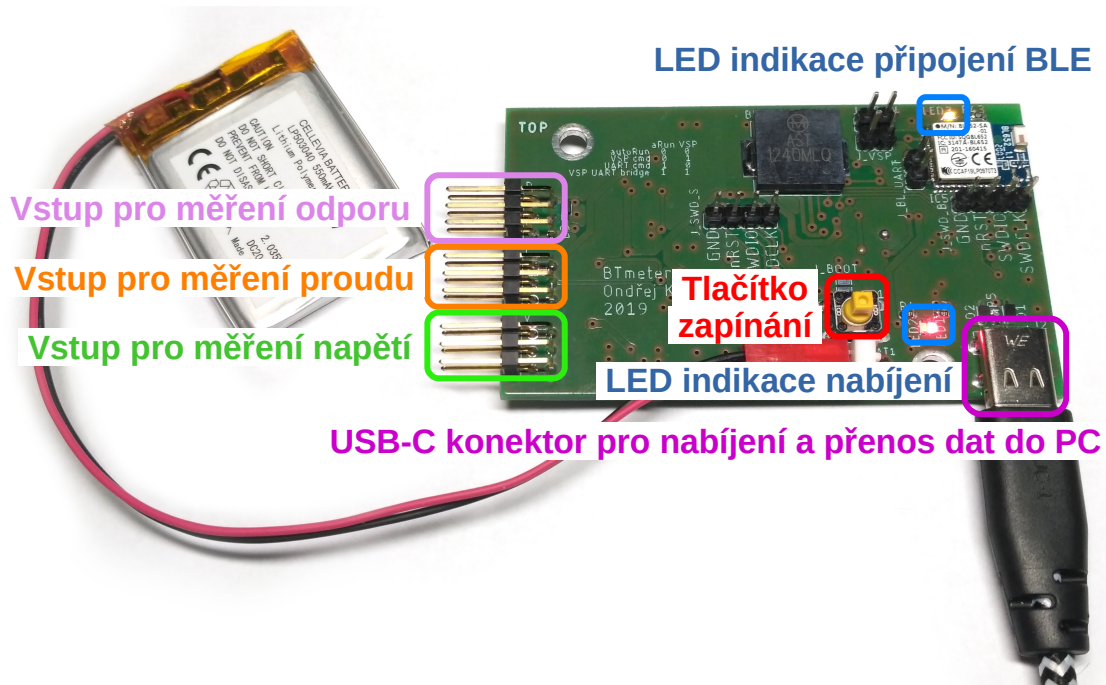
Automaticky je také z aktuálních hodnot napětí a proudu počítána hodnota výkonu daná jejich součinem.

Na obrázku 2.15 jsou zvýrazněny uživatelské prvky zařízení. LED indikace připojení BLE může:

- být zhasnutá - multimetr je vypnutý,
- blikat - multimetr je zapnutý a čeká na připojení,
- svítit - multimetr je zapnutý a připojený s mobilním telefonem.

LED indikace nabíjení může:

- být zhasnutá - multimetr není připojen ke zdroji nabíjení,
- svítit červeně - probíhá nabíjení akumulátoru,
- svítit zeleně - akumulátor je plně nabitý.



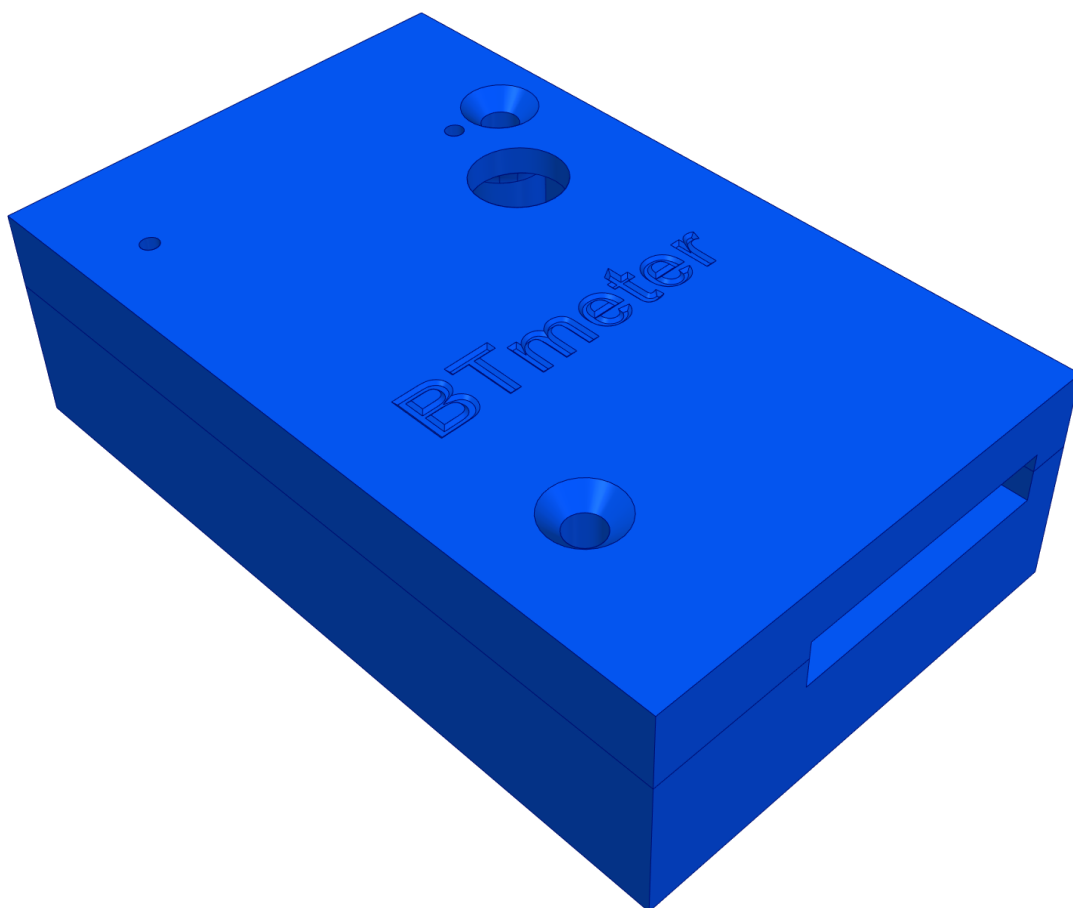
Obr. 2.15: Popis uživatelských prvků multimetru

2.9 Přístrojová krabička

Pro ochranu multimetru a zamezení náhodnému dotyku či zkratu při manipulaci s multimetrem byla navržena konstrukce přístrojové krabičky pomocí CAD²⁸ programu SolidEdge ST10[27].

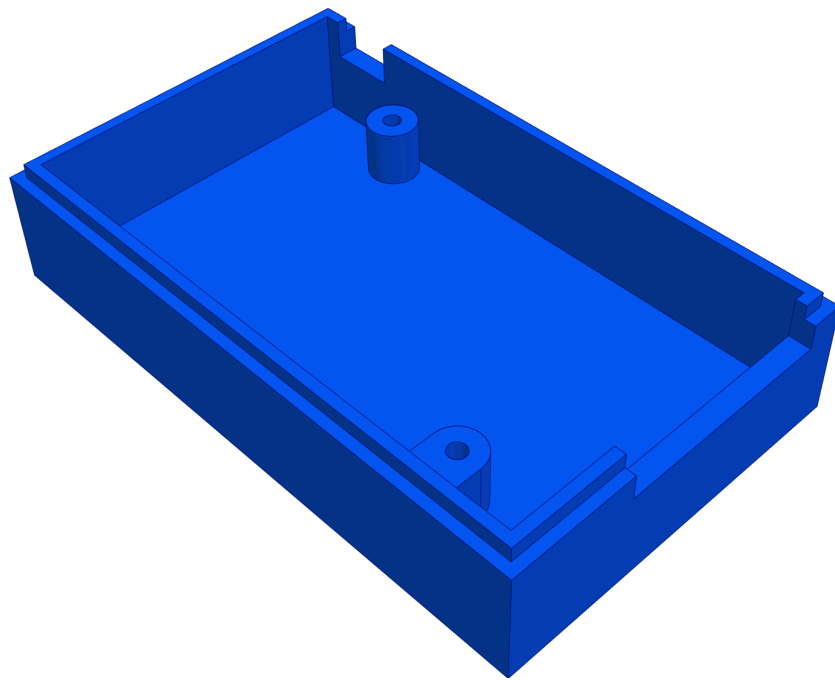
Skládá se ze dvou částí - dolní a vrchní. Vnější rozměry celé konstrukce činí 85×52,35×24,6 mm. Uvnitř je v dolní části prostor pro umístění akumulátoru. Nad ním je konstrukčně vyřešené dosednutí desky plošných spojů na dva duté sloupky, které jsou uzpůsobeny pro sešroubování krabičky pomocí vrutů s průměrem hlavy 6,8 mm, průměrem závitu 3,5 mm a celkovou délkou 19 mm. Sestrojením krabičky dojde ke stisknutí desky plošných spojů mezi sloupky, čímž je zajištěno její uchycení.

Model je navržen tak, aby bylo možno celou konstrukci vytisknout na 3D tiskárně. 3D vizualizace je na obrázcích 2.16, 2.17 a 2.18.

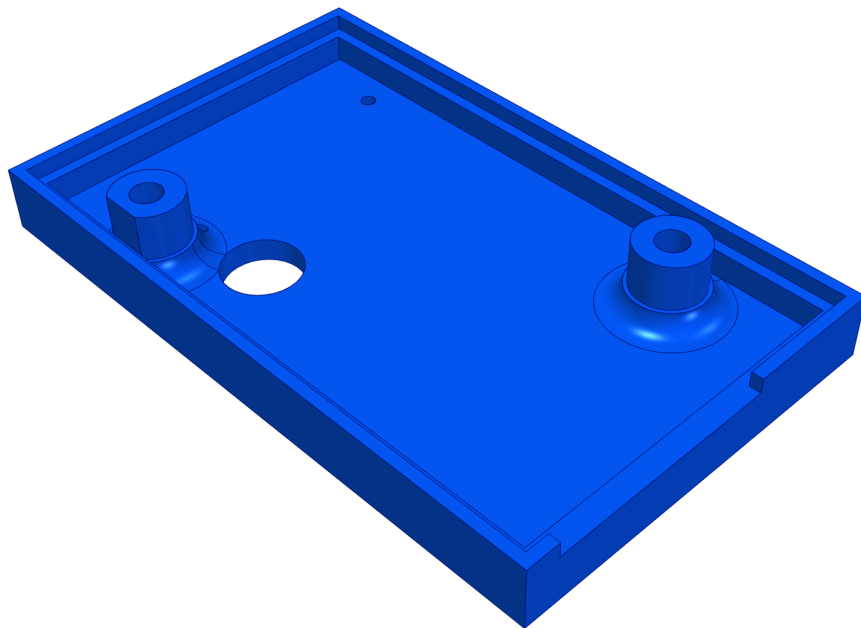


Obr. 2.16: Vizualizace sestavené přístrojové krabičky

²⁸Computer aided design - software určený k projektování, především ve strojírenství



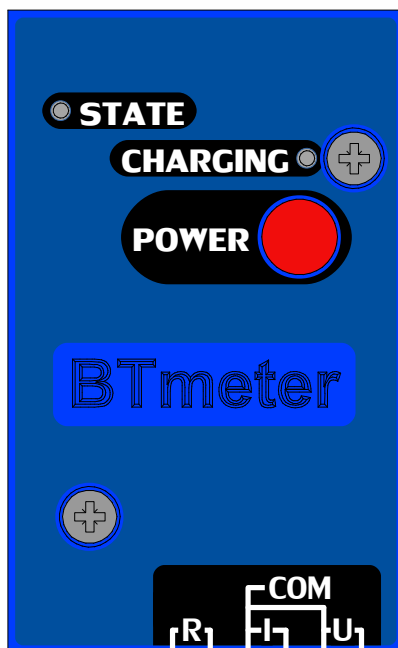
Obr. 2.17: Vizualizace dolní části přístrojové krabičky



Obr. 2.18: Vizualizace horní části přístrojové krabičky

2.9.1 Čelní štítek

Protože je přístrojová krabička navržena pro výrobu na 3D tiskárně, je z praktických zkušeností ověřeno, že drobné prvky nemají při tisku vynikající kvalitu. Proto byl také navržen vzhled štítku, který bude nalepen na vrchní straně multimetru, aby byly dostatečně rozlišeny především měřicí vstupy. Na obrázku 2.19 je zobrazena vizualizace čelní strany multimetru s nalepeným štítkem v měřítku 1:1.



Obr. 2.19: Vizualizace čelní strany multimetru s nalepeným štítkem

3 Závěr

Výsledkem této práce je funkční prototyp kompaktního multimetru o vnějších rozměrech přibližně $8,5 \times 5,2 \times 2,5$ cm. Je určený pro slaboproudé obvody, takže je vhodný například pro nenáročná měření při tzv. “bastlení”. Hlavní výhodou bezdrátového přenosu měřených hodnot, se při jeho testování ukázala možnost zapojení multimetru do měřeného obvodu na místě vzdáleném od uživatele (vedlejší místnost apod.).

Kontrolní měření, které bylo provedeno ukázalo, že multimetr měří napětí a proud v zadaném rozsahu s odchylkou menší než 1 %. Kvůli atypickému zapojení měřicí části odporů se však nepodařilo realizovat jejich přesné měření. Teoreticky by však mělo být možné tuto chybu odstranit pouhým vylepšením softwaru, implementací korekční křivky. Společně s tím je dále možné přidat multimetru nové funkce bez nutné úpravy hardwaru, který například nevyklučuje dodatečnou možnost implementace střídavých měření.

Během testování multimetru byly také zjištěny potenciální části hardwaru, které by v případě budoucí výroby další verze zařízení byly vhodné pozměnit. Nabízí se například vyvedení nevyužitých vývodů hlavního mikrokontroléru a jejich využití pro měření v digitálních obvodech.

Zdroje

- [1] Bluetooth Special Interest Group. *Our history*. *Bluetooth.com* [online]. ©2019 [cit. 25. 7. 2019]. Dostupné z: <https://www.bluetooth.com/about-us/our-history/>
- [2] Bluetooth Special Interest Group. *Origin of the Bluetooth Name*. *Bluetooth.com* [online]. ©2019 [cit. 25. 7. 2019]. Dostupné z: <https://www.bluetooth.com/about-us/bluetooth-origin/>
- [3] IEEE Standards. *IEEE 802.15.1-2002 - IEEE Standard for Telecommunications and Information Exchange Between Systems - LAN/MAN - Specific Requirements - Part 15: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs)*. *Standards.ieee.org* [online]. ©2019 [cit. 30. 7. 2019]. Dostupné z: https://standards.ieee.org/standard/802_15_1-2002.html
- [4] TOWNSEND, Kevin, Robert DAVIDSON, AKIBA a Carles CUFÍ. *Getting started with Bluetooth low energy: tools and techniques for low-power networking*. Revised First Edition. Sebastopol, CA: O'Reilly, 2014. ISBN 978-1-491-94951-1.
- [5] Bluetooth Special Interest Group. *Bluetooth Core Specification v5.1 Feature Overview*. *Bluetooth.com* [online]. ©2019 [cit. 29. 9. 2019]. Dostupné z: <https://www.bluetooth.com/bluetooth-resources/bluetooth-core-specification-v5-1-feature-overview/>
- [6] Microchip Technology, Inc. *Microchip Developer Help: Bluetooth® Low Energy* [online]. ©2019 [cit. 7. 12. 2019]. Dostupné z: <https://microchipdeveloper.com/wireless:ble-introduction>
- [7] Bluetooth Special Interest Group. *GATT Specifications*. *Bluetooth.com* [online]. ©2019 [cit. 10. 12. 2019]. Dostupné z: <https://www.bluetooth.com/specifications/gatt/>
- [8] Autodesk Inc. *EAGLE* [online]. ©2019 [cit. 15. 12. 2019]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/eagle/overview/>
- [9] Microchip Technology Inc. *Datasheet MCP73831/2* [online]. ©2005-2014 [cit. 15. 12. 2019]. Dostupné z: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/en024903/>

- [10] Texas Instruments Incorporated. *Datasheet TPS6300x* [online]. ©2006-2015 [cit. 15.12.2019]. Dostupné z: <https://www.ti.com/store/ti/en/p/product/?p=TPS63001DRCR>
- [11] LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION. *Datasheet LTC2950* [online]. ©2008 [cit. 15.12.2019]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/products/ltc2950.html>
- [12] STMicroelectronics. *Datasheet STM32F373* [online]. ©2016 [cit. 15.12.2019]. Dostupné z: https://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32-mainstream-mcus/stm32f3-series/stm32f373/stm32f373c8.html
- [13] Future Technology Devices International Limited. *Datasheet FT230* [online]. ©2008 [cit. 15.12.2019]. Dostupné z: <https://www.ftdichip.com/Products/ICs/FT230X.html>
- [14] Analog Devices, Inc. *Datasheet AD8515* [online]. ©2002–2017 [cit. 3.6.2020]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/products/ad8515.html>
- [15] Analog Devices, Inc. *Datasheet AD8227* [online]. ©2009 [cit. 3.6.2020]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/products/ad8227.html>
- [16] Analog Devices, Inc. *Datasheet ADP122* [online]. ©2009–2012 [cit. 3.6.2020]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/products/adp122.html>
- [17] Laird. *BL652 product page* [online]. ©2019 [cit. 15.12.2019]. Dostupné z: <https://www.lairdconnect.com/wireless-modules/bluetooth-modules/bluetooth-5-modules/bl652-series-bluetooth-v5-nfc>
- [18] Laird Connectivity. *BL652-Applications* [online]. ©2019 [cit. 15.12.2019]. Dostupné z: <https://github.com/LairdCP/BL652-Applications>
- [19] *Online GUID Generator* [online]. [cit. 1.6.2020]. Dostupné z: <https://www.guidgenerator.com/online-guid-generator.aspx>
- [20] GatemaPCB.cz. *Technické informace* [online]. ©2020 [cit. 1.6.2020]. Dostupné z: <https://www.gatemapcb.cz/technicke-informace>
- [21] Nordic Semiconductor ASA. *nRF Connect for Mobile* [software]. ©2019 [cit. 16.12.2019]. Dostupné z: <https://play.google.com/store/apps/details?id=no.nordicsemi.android.mcp&hl=cs>

- [22] Universitat Politècnica de València. *HAL Drivers User Manual* [online]. [cit. 1. 6. 2020]. Dostupné z: http://www.disca.upv.es/aperles/arm_cortex_m3/l1libre/st/STM32F439xx_User_Manual/index.html
- [23] MARINONI Enrico. STM32 Basic Timer in Interrupt & PWM mode *EMCU.eu* [online]. [cit. 1. 6. 2020]. Dostupné z: <http://www.emcu.eu/stm32-basic-timer/#PWM>
- [24] Don HO. *Notepad++* [software]. [cit. 1. 6. 2020]. Dostupné z: <https://notepad-plus-plus.org/>
- [25] Massachusetts Institute of Technology. *MIT App Inventor* [software]. © 2012-2020 [cit. 1. 6. 2020]. Dostupné z: <http://appinventor.mit.edu/>
- [26] Massachusetts Institute of Technology. BluetoothLE. *Internet of Things* [online]. © 2017-2018 [cit. 1. 6. 2020]. Dostupné z: <http://iot.appinventor.mit.edu/#/bluetoothle/bluetoothleintro>
- [27] Siemens Digital Industry Software. *SolidEdge ST10* [software]. © 2020 [cit. 1. 6. 2020]. Dostupné z: <https://solidedge.siemens.com/cs/>
- [28] KOUDELKA, Ctirad, VRÁNA, Václav. *Ochrana před přepětím*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra obecné elektrotechniky, 2006. Prezentace. Dostupné z: http://feil.vsb.cz/kat420/vyuka/BC_FBI/Prednasky/ochrana%20pred%20prepetim.pdf
- [29] HORČÍK, Zdeněk. *Zesilovače biologických signálů*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra teorie obvodů. Prezentace. Dostupné z: https://cw.fel.cvut.cz/b172/_media/courses/a6m31let/difzes.pdf
- [30] MIKULKA, Jan, MARCOŇ, Petr. *Měřicí zesilovače, operační zesilovače, přístrojový zesilovač*. Brno: Vysoká učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav teoretické a experimentální elektrotechniky, 2018. Prezentace.
- [31] MIKULKA, Jan, MARCOŇ, Petr. *Měření pasivních elektrických veličin*. Brno: Vysoká učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav teoretické a experimentální elektrotechniky, 2018. Prezentace.
- [32] STMicroelectronics. *STM32CubeIDE* [software]. © 2020 [cit. 3. 6. 2020]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>

- [33] SHATTUCK, Tom. *Nonlinear Least Squares Curve Fitting* [online]. [cit. 3.6.2020]. Dostupné z: <http://www.colby.edu/chemistry/PChem/scripts/lsfitpl.html>

Seznam zkratek

| | |
|---------------|---|
| AD | Analog/Digital - označení analogově-digitálního převodníku |
| AES | Advanced Encryption Standard - standardizovaný šifrovací algoritmus |
| AFH | Adaptive Frequency Hopping - metoda využití spektra průběžnými změnami nosného kmitočtu |
| API | Application Programming Interface - sbírka předpřipravených knihoven tvořící softwarové rozhraní pro zjednodušení vývoje aplikací |
| ATT | Attribute Protocol - viz kapitola 1.2.6 |
| Bd | Baud - jednotka přenosové rychlosti |
| BLE | Bluetooth Low Energy - moderní bezdrátová technologie |
| BOM | Bill of Materials - soupiska použitých součástí |
| CAD | Computer aided design - software určený k projektování, především ve strojírenství |
| CRC | Cyclic Redundancy Check - cyklický redundantní součet |
| ČSN | Česká technická norma |
| CTS | Clear to send - vstupní řídicí signál rozhraní UART |
| DC | Direct current - stejnosměrný proud |
| DRC | Design Rule Check - nástroj pro automatické vyhledávání návrhových chyb v programu EAGLE |
| ESD | Electrostatic discharge - elektrostatický výboj |
| FPU | Floating-Point Unit - matematický koprocessor určený pro výpočty aritmetických operací s pohyblivou řádovou čárkou |
| GAP | Generic Access Profile - viz kapitola 1.2.7 |
| GATT | Generic Attribute Profile - viz kapitola 1.2.8 |
| GFSK | Gaussian Frequency Shift Keying - metoda modulace frekvenčním posunem |
| HAL | Hardware abstraction layer - vrstva vytvářející jednotné programové rozhraní |
| HCI | Host Controller Interface - viz kapitola 1.2.3 |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství |
| ISM | Industrial, Scientific and Medical - soubor kmitočtových pásem k volnému užití |
| L2CAP | Logical Link Control and Adaptation Protocol - viz kapitola 1.2.4 |
| Li-pol | Lithium Polymer - technologie elektronických akumulátorů |
| LL | Link Layer - linková vrstva |
| LSB | Least significant bit - nejméně významný bit |
| LTK | Long Term Key - dlouhodobý (trvalý) šifrovací klíč |

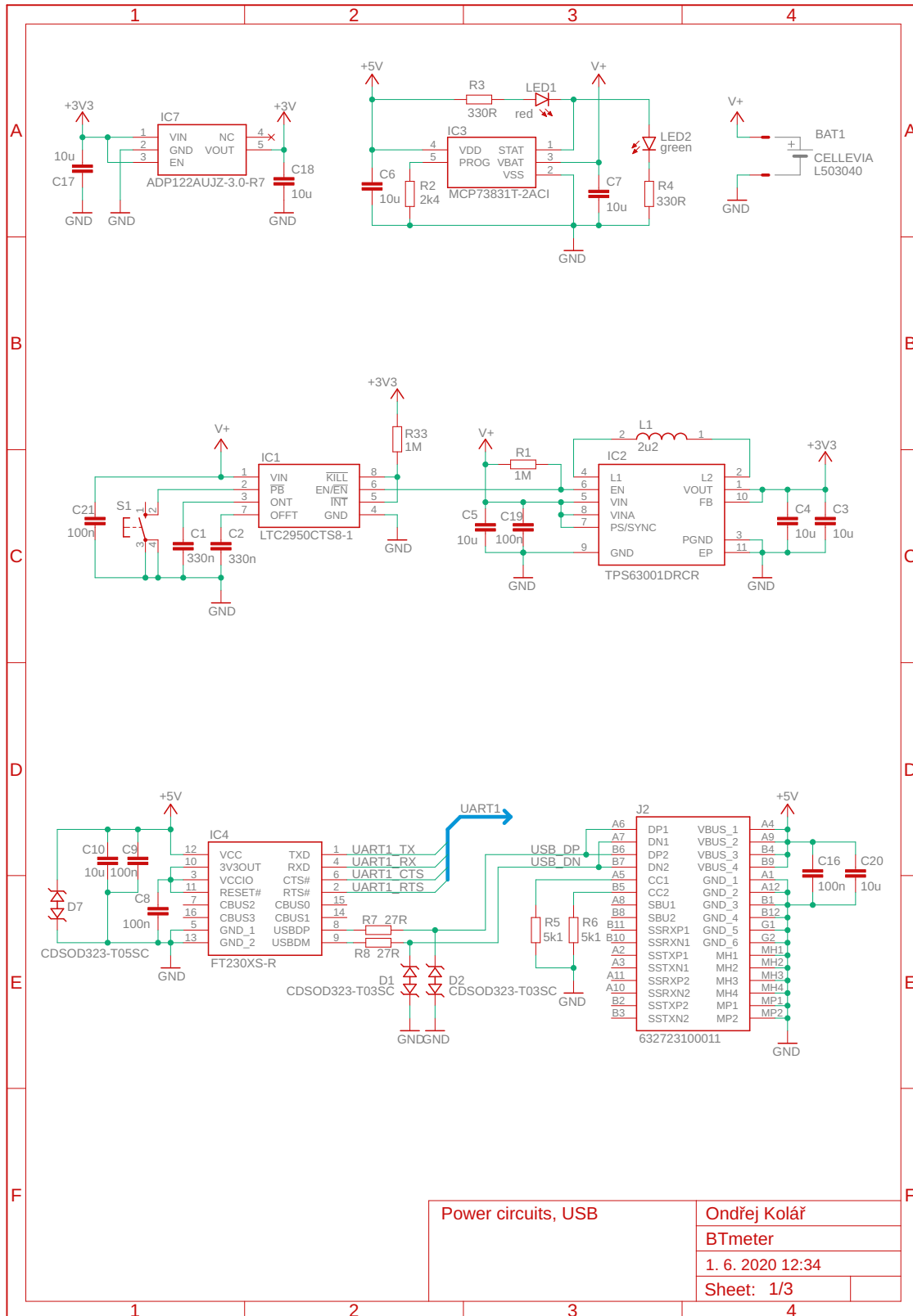
| | |
|--------------|--|
| MCU | Microcontroller unit - mikrokontrolér |
| MITM | Man in the Middle Attack - typ útoku spočívající v odposlechu komunikace třetí stranou |
| NFC | Near Field Communication - bezdrátová technologie pro komunikaci na krátké vzdálenosti |
| OZ | Operační zesilovač |
| PHY | Physical Layer - fyzická vrstva |
| RTS | Request to send - výstupní řídicí signál rozhraní UART |
| SDADC | Sigma-delta analog-to-digital converter - typ analogově digitálního převodníku |
| SIG | Special Interest Group - organizace zaštitující určitý zájem |
| SMP | Security Manager Protocol - viz kapitola 1.2.5 |
| SoC | System on Chip - integrovaný obvod obsahující všechny dílčí části elektronického zařízení v jediném čipu |
| STK | Short Term Key - krátkodobý (dočasný) šifrovací klíč |
| TVS | Transient voltage supression - potlačení přechodového jevu |
| UART | Universal Asynchronous Receiver-Transmitter - univerzální asynchronní rozhraní |
| USB | Universal Serial Bus - univerzální sériová počítačová sběrnice |
| UUID | Universally Unique Identifier - univerzální unikátní identifikační číslo |
| VF | Vysokofrekvenční |
| Wi-Fi | bezdrátové komunikační rozhraní využívané především v počítačových sítích |

Seznam příloh

| | |
|--|-----------|
| A Schéma zapojení | 62 |
| A.1 Strana 1 - Napájení a USB | 62 |
| A.2 Strana 2 - Digitální část | 63 |
| A.3 Strana 3 - Analogová část | 64 |
| B Soupiska součástek | 65 |
| C Plošný spoj (měřítko 2:1) | 66 |
| C.1 Vrstva <i>Top copper</i> | 66 |
| C.2 Vrstva <i>Bottom copper</i> | 66 |
| C.3 Osazovací plán <i>Top</i> | 67 |
| C.4 Osazovací plán <i>Bottom</i> | 67 |
| D Program mobilní aplikace | 68 |
| E Elektronické přílohy | 70 |

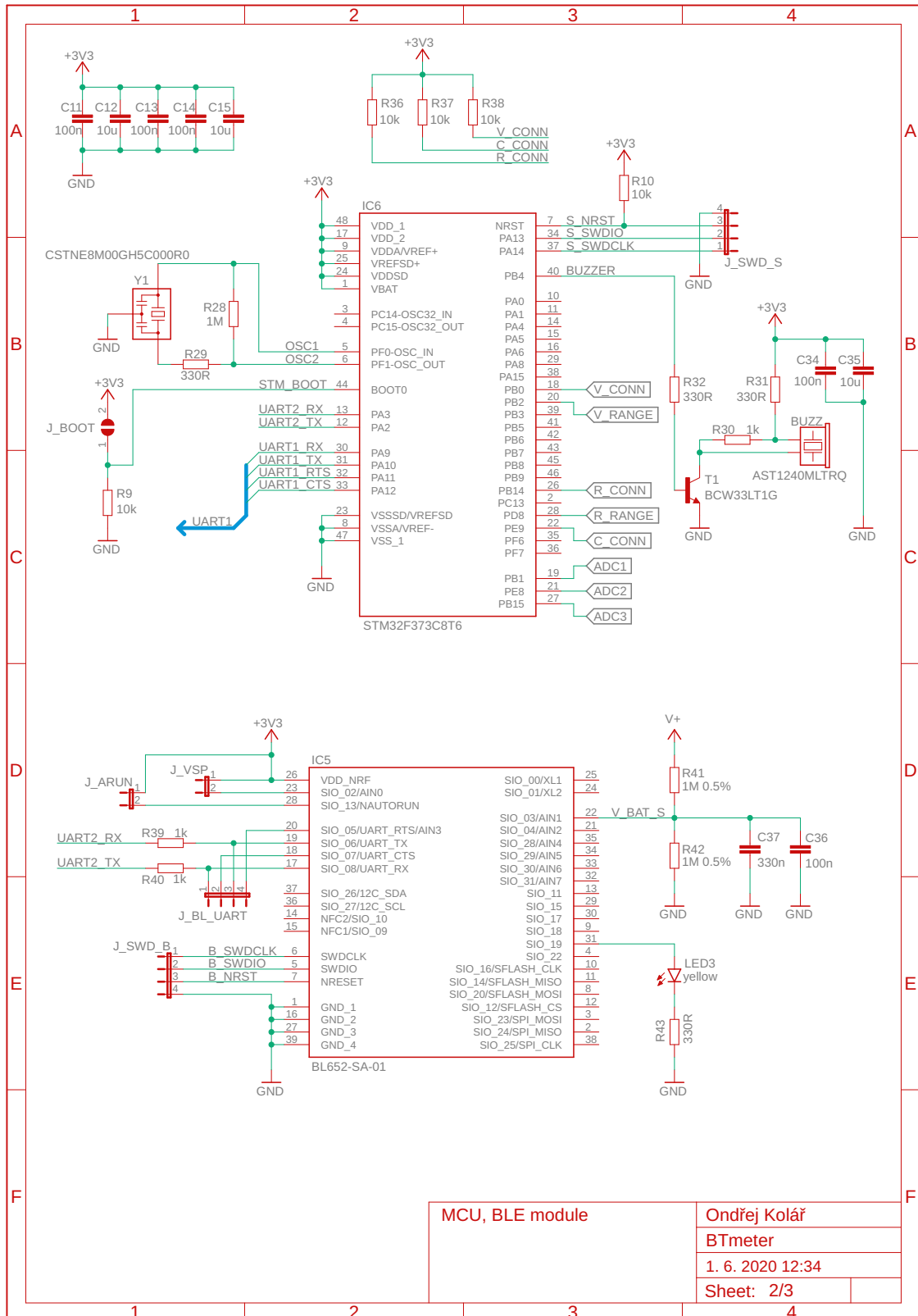
A Schéma zapojení

A.1 Strana 1 - Napájení a USB

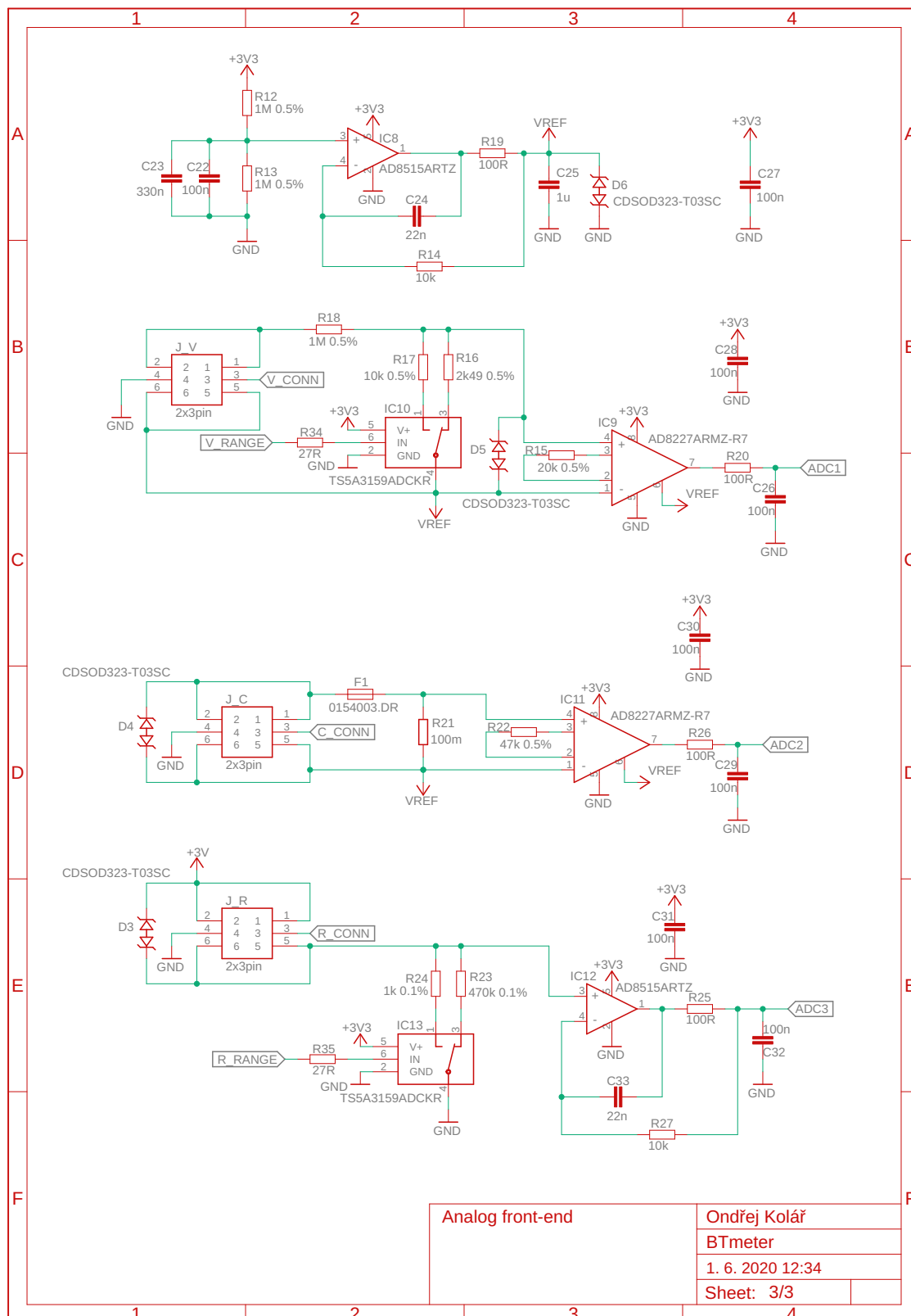


| | |
|---------------------|------------------|
| Power circuits, USB | Ondřej Kolář |
| | BTmeter |
| | 1. 6. 2020 12:34 |
| | Sheet: 1/3 |

A.2 Strana 2 - Digitální část



A.3 Strana 3 - Analogová část

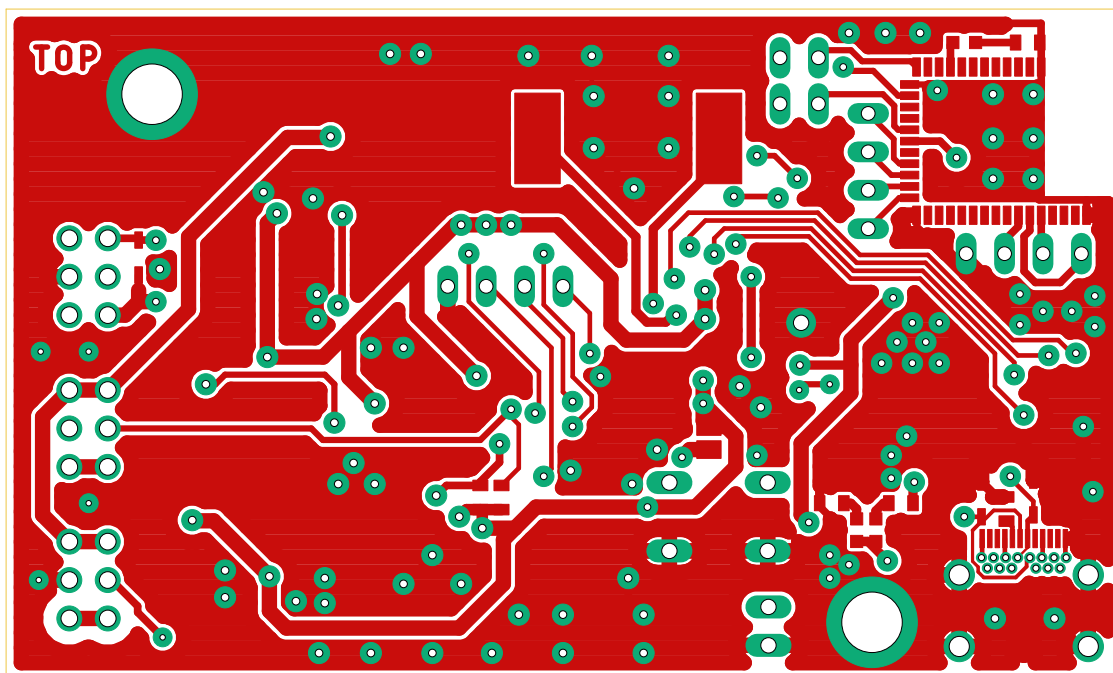


B Soupiska součástek

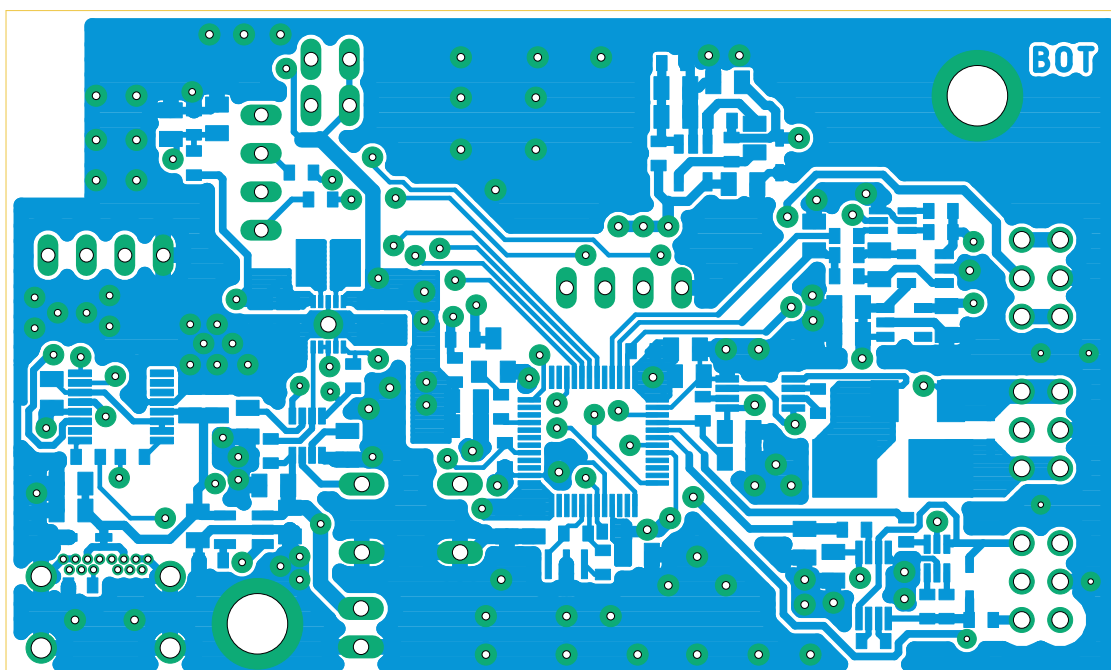
| Poč. | Označení ve schématu | Součástka | Hodnota / Pozn. | Pouzdro |
|------|--|---------------------|----------------------------|----------------|
| 1 | R21 | R 2010 | 100m | 2010 |
| 1 | F1 | 0154003.DR | 3A pojistka Littelfuse | 0154.250DR |
| 1 | LED1 | LED 0603 | červená | 0603 |
| 1 | LED2 | LED 0603 | zelená | 0603 |
| 1 | LED3 | LED 0603 | žlutá | 0603 |
| 3 | R1, R28, R33 | R 0603 | 1M | 0603 |
| 5 | R12, R13, R18, R41, R42 | R 0603 | 1M 0.5% | 0603 |
| 1 | R15 | R 0603 | 20k 0.5% | 0603 |
| 1 | R16 | R 0603 | 2k49 0.5% | 0603 |
| 1 | R17 | R 0603 | 10k 0.5% | 0603 |
| 4 | R19, R20, R25, R26 | R 0603 | 100R | 0603 |
| 1 | R2 | R 0603 | 2k4 | 0603 |
| 1 | R22 | R 0603 | 47k 0.5% | 0603 |
| 1 | R23 | R 0603 | 470k 0.1% | 0603 |
| 1 | R24 | R 0603 | 1k 0.1% | 0603 |
| 6 | R3, R4, R29, R31, R32, R43 | R 0603 | 330R | 0603 |
| 3 | R30, R39, R40 | R 0603 | 1k | 0603 |
| 2 | R5, R6 | R 0603 | 5k1 | 0603 |
| 4 | R7, R8, R34, R35 | R 0603 | 27R | 0603 |
| 7 | R9, R10, R14, R27, R36, R37, R38 | R 0603 | 10k | 0603 |
| 4 | C1, C2, C23, C37 | C 0805 | 330n | 0805 |
| 2 | C24, C33 | C 0805 | 22n | 0805 |
| 1 | C25 | C 0805 | 1u | 0805 |
| 12 | C3, C4, C5, C6, C7, C10, C12, C15, C17, C18, C20, C35 | C 0805 | 10u | 0805 |
| 18 | C8, C9, C11, C13, C14, C16, C19, C21, C22, C26, C27, C28, C29, C30, C31, C32, C34, C36 | C 0805 | 100n | 0805 |
| 1 | J2 | 632723100011 | USB-C konektor Wurth | 632723100011 |
| 1 | BAT1 | 22-05-7028-02 | Konektor akumulátoru | 7395-02 |
| 3 | J_C, J_R, J_V | 77317-803-06LF | Pinová lišta 3x2 90° | 7731780306LF |
| 1 | BUZZ | AST1240MLTRQ | Piezo | AST1240MLTRQ |
| 1 | S1 | B3F-1052 | Tlačítko | B3F-10XX |
| 1 | IC5 | BL652-SA-01 | BLE modul | BL652-SA-01 |
| 1 | Y1 | CSTNE8M00GH5C000R0 | Rezonátor 8MHz | CSTNE |
| 1 | L1 | LQH3NPN2R2MJRL | 2u2 | INDPM3030X120N |
| 1 | J_ARUN | JP1E | Pinová lišta 2x1 | JP1 |
| 1 | J_VSP | JP1E | Pinová lišta 2x1 | JP1 |
| 3 | J_BL_UART, J_SW_D_B, J_SW_D_S | JP4E | Pinová lišta 4x1 přímá | JP4 |
| 1 | IC6 | STM32F373C8T6 | Mikrokontrolér | QFP50P900X900 |
| 1 | J_BOOT | SJ | Pájecí plošky | SJ |
| 6 | D1, D2, D3, D4, D5, D6 | CDSOD323-T03SC | TVS dioda bipolární | SOD2513X114N |
| 1 | D7 | CDSOD323-T05SC | TVS dioda bipolární | SOD2513X114N |
| 1 | IC2 | TPS63001DRCR | DC/DC měnič | SON50P300X300 |
| 1 | IC4 | FT230XS-R | USB/UART převodník | SOP64P599X175 |
| 2 | IC9, IC11 | AD8227ARMZ-R7 | Přístrojový zesilovač | SOP65P490X110 |
| 1 | T1 | BCW33LT1G | NPN tranzistor | SOT23-BEC |
| 2 | IC10, IC13 | TS5A3159ADCKR | Polovodičový prepínač | SOT65P210X110 |
| 1 | IC1 | LTC2950CTS8-1#TRPBF | Kontrolér tlačítka zapnutí | SOT65P280X100 |
| 1 | IC3 | MCP73831T-2ACI_OT | Kontrolér nabíjení Li-Pol | SOT95P270X145 |
| 1 | IC7 | ADP122AUJZ-3.0-R7 | Lineární stabilizátor | SOT95P280X100 |
| 2 | IC8, IC12 | AD8515ARTZ | Operační zesilovač | SOT95P280X145 |

C Plošný spoj (měřítko 2:1)

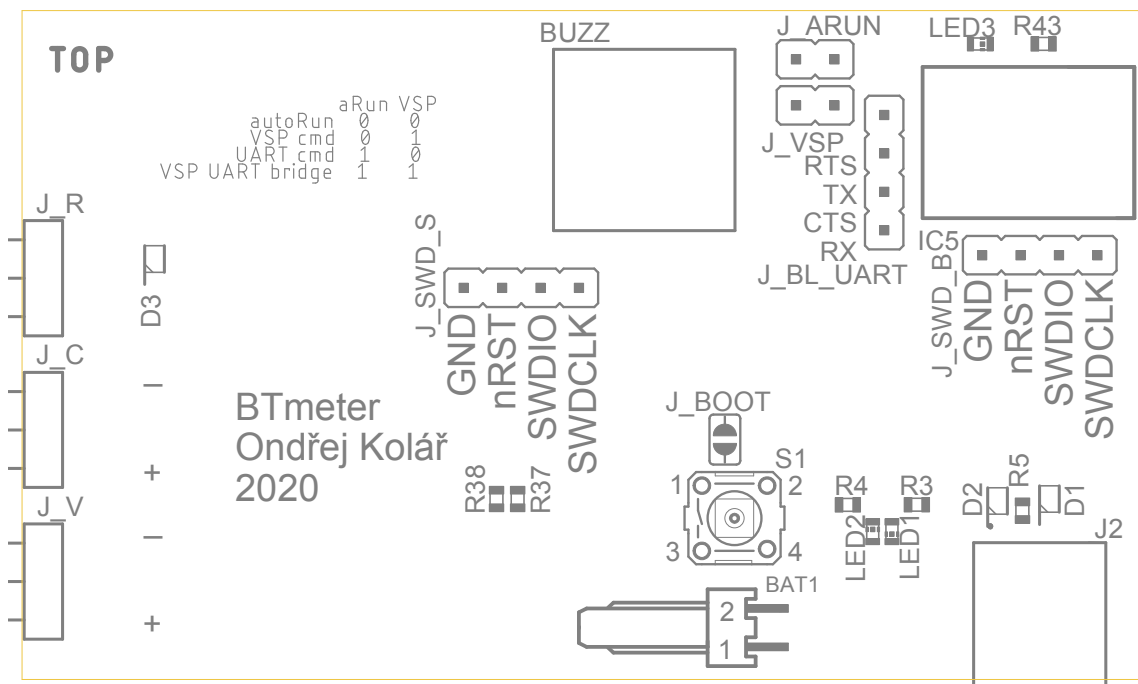
C.1 Vrstva *Top copper*



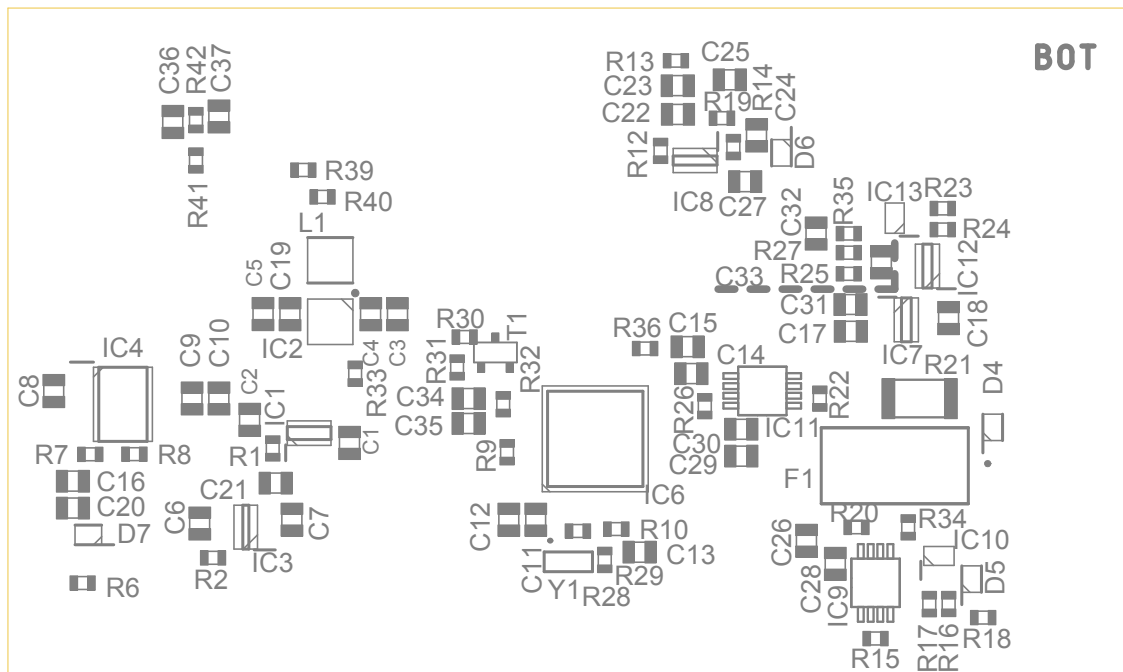
C.2 Vrstva *Bottom copper*



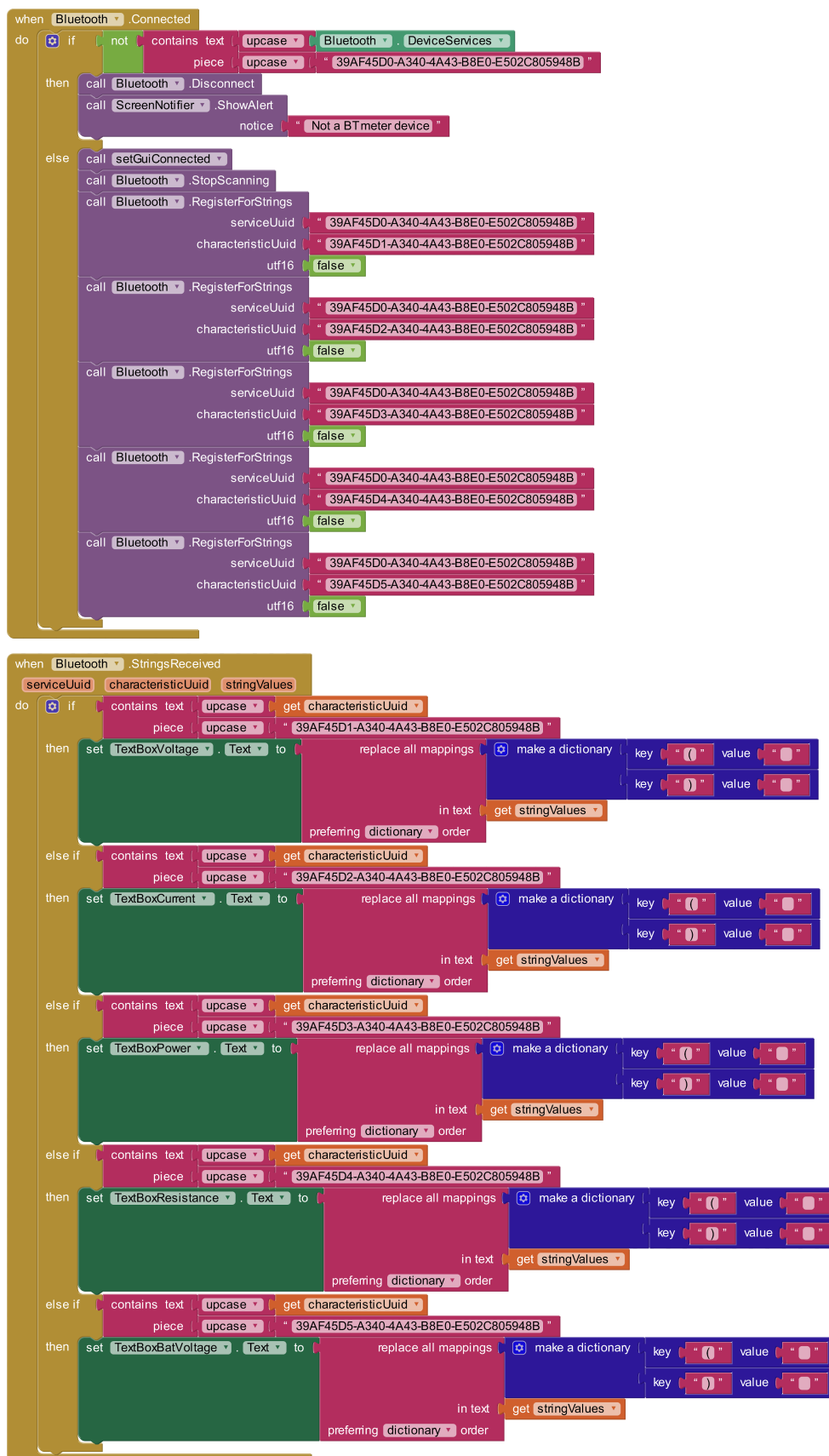
C.3 Osazovací plán *Top*



C.4 Osazovací plán *Bottom*



D Program mobilní aplikace



```

when Screen1.Initialize
do
  call setGuiDisconnected
  call Bluetooth.StartScanning

when Bluetooth.DeviceFound
do
  set listBLE.ElementsFromString to Bluetooth.DeviceList

when listBLE.AfterPicking
do
  set Screen1.Title to "BTmeter - Connecting..."
  call Bluetooth.Connect
  index listBLE.SelectionIndex
  set listBLE.Elements to create empty list

when Bluetooth.ConnectionFailed
  reason
do
  call ScreenNotifier.ShowAlert
  notice "Connection failed"
  call setGuiDisconnected
  call Bluetooth.StartScanning

when Bluetooth.Disconnected
do
  call setGuiDisconnected
  call Bluetooth.StartScanning

when Screen1.BackPressed
do
  if Bluetooth.IsDeviceConnected
  then call Bluetooth.Disconnect
  else close application

when ButtonDisconnect.Click
do
  call Bluetooth.Disconnect

when Clock500ms.Timer
do
  if not Bluetooth.IsDeviceConnected and not Bluetooth.Scanning
  then call Bluetooth.StartScanning

when Clock5s.Timer
do
  if Bluetooth.IsDeviceConnected
  then call ScreenKeeper.ShowAlert
  notice " "

to setGuiDisconnected
do
  set ButtonDisconnect.Visible to false
  set Screen1.Title to "BTmeter - Select device"
  set listBLE.Elements to create empty list
  set listBLE.Visible to true
  set TableArangementValues.Visible to false

to setGuiConnected
do
  set Screen1.Title to "BTmeter - Connected"
  set listBLE.Visible to false
  set ButtonDisconnect.Visible to true
  set TableArangementValues.Visible to true
  set TextBoxVoltage.Text to " "
  set TextBoxCurrent.Text to " "
  set TextBoxPower.Text to " "
  set TextBoxResistance.Text to " "
  set TextBoxBatVoltage.Text to " "

```

E Elektronické přílohy

```
\..... Kořenový adresář
├── BL652\ ..... Složka s programem pro BLE modul
├── DPS\
│   ├── dokumentace\ ..... Složka s PDF dokumentací DPS
│   ├── Eagle_9-3-0\ ..... Složka s projektem programu Eagle
│   └── BTmeter_GERBER.zip ..... Archiv s Gerber soubory pro výrobu DPS
├── kryt\
│   ├── obrázky\ ..... Složka s obrázky přístrojové krabičky multimetru
│   ├── SolidEdge_ST10\ ..... Složka s modely přístrojové krabičky multimetru
│   ├── stl\ ..... Složka s modely krabičky ve formátu STL pro 3D tisk
│   └── stitek.pdf ..... Grafický návrh čelního štítku multimetru
├── mobilni_aplikace\
│   ├── BTmeter.aia ... Exportovaný projekt vývojového prostředí App Inventor
│   └── BTmeter.apk ..... Instalační soubor mobilní aplikace pro OS Android
├── STM32F373\
│   ├── BTmeter\ ..... Složka projektu vývojového prostředí STM32CubeIDE
│   └── BTmeter.bin ..... Zkompilovaný program hlavního mikrokontroléru
```