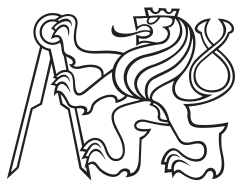


Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická

Mobilní impedanční analyzátor

Bc. Jan Vomočil

Vedoucí práce: Ing. Jan Novák, Ph.D.

Obor: Elektronika

Studijní program: Elektronika a komunikace

Srpen 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vomočil** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **457169**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Elektronika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Mobilní impedanční analyzátor

Název diplomové práce anglicky:

Mobile Impedance Analyzer

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s metodami měření impedance využívaných v přenosných LCRG metrech.
- 2) Prostudujte možnost využití digitálního impedančního převodníku AD5933.
- 3) Navrhněte přenosný impedanční analyzátor LCR prvků s možností měření kmitočtových charakteristik a exportu dat do počítače.
- 4) Zapojení realizujte ve formě funkčního vzorku.
- 5) Měření ověřte funkci analyzátoru a stanovte míru nejistoty měření LCR prvků.
- 6) Zhodnoťte dosažené výsledky a navrhněte případná rozšíření.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Haasz, V. a kol.: Elektrická měření. Přístroje a metody, 3. přeprac. vydání, skripta ČVUT Praha.
- [2] Dostál, J.: Operační zesilovače, BEN Praha 2008.
- [3] Katalogové a aplikační listy integrovaného obvodu AD5933.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Novák, Ph.D., katedra mikroelektroniky FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **07.02.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **14.08.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2021**

Ing. Jan Novák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Janu Novákovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky, které vedly ke zlepšení a pomohly ke vzniku této diplomové práce. Dále bych chtěl také poděkovat svým kamarádům Ing. Vladimíru Čebišovi a Bc. Petru Šebestovi, kteří mi byli oporou.

Prohlášení

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

V Praze, 10. srpna 2020

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem a konstrukcí přenosného impedančního analyzátoru, který je určen pro provozní analýzu impedance. Analyzátor je postavený na integrovaném obvodu AD5933. Zařízení je napájeno z akumulátoru a ukládá data na paměťové médium.

Klíčová slova: Impedance, Impedanční analyzátor, Metody měření impedance, Mobilní, Přenosný, AD5933, STM32L072CBT6, ADG849, SD karta

Vedoucí práce: Ing. Jan Novák, Ph.D.

Abstract

This master thesis deals with design and construction of an mobile impedance analyzer that is suitable for easy impedance analysis. The analyzer is built on the AD5933 integrated circuit. The device is powered by a battery and stores data on a storage medium.

Keywords: Impedance, Analyzer, Measuring Impedance, Mobile, AD5933, STM32L072CBT6, ADG849, SD card

Title translation: Mobile impedance analyzer

Obsah

| | | | |
|---|-----------|--|--|
| 1 Úvod | 1 | | |
| 2 Teoretický úvod | 3 | | |
| 2.1 Impedance | 3 | | |
| 2.2 Admitance | 4 | | |
| 2.3 Náhradní schéma cívky a kondenzátoru | 4 | | |
| 2.3.1 Náhradní schéma kondenzátoru | 4 | | |
| 2.3.2 Náhradní schéma cívky | 5 | | |
| 2.3.3 Dualita obvodů | 5 | | |
| 2.3.4 Činitel jakosti a ztrátový koeficient | 5 | | |
| 2.4 Metody měření impedance | 6 | | |
| 2.4.1 Ohmova metoda | 6 | | |
| 2.4.2 Srovnávací metody měření | 7 | | |
| 2.4.3 Můstkové metody měření | 9 | | |
| 2.4.4 Rezonanční metody měření | 9 | | |
| 2.4.5 Číslíkové metody měření | 10 | | |
| 2.4.6 Shrnutí metod měření | 12 | | |
| 3 Popis dostupných přístrojů a používané metody měření | 13 | | |
| 3.1 DMM s měřením kapacit | 13 | | |
| 3.2 ESR metr | 13 | | |
| 3.3 Q-metr | 14 | | |
| 3.4 LCR metr | 14 | | |
| 3.5 Impedanční analyzátor | 15 | | |
| 4 Návrh řešení | 17 | | |
| 4.1 Napájecí část | 18 | | |
| 4.1.1 Uvedení do provozu | 19 | | |
| 4.1.2 Části napájecího systému | 19 | | |
| 4.2 Číslíková část | 20 | | |
| 4.2.1 Řídicí mikrokontrolér | 20 | | |
| 4.2.2 Zdroj hodinového signálu | 21 | | |
| 4.2.3 Ovládání - displej, tlačítka | 22 | | |
| 4.2.4 SD karta | 24 | | |
| 4.3 Analogová část | 25 | | |
| 4.3.1 Impedanční převodník AD5933 | 25 | | |
| 4.3.2 Vstupní analogová část | 27 | | |
| 5 Realizace | 29 | | |
| 5.1 Plošný spoj | 29 | | |
| 5.1.1 Hlavní plošný spoj | 29 | | |
| 5.1.2 Plošný spoj ovládacích prvků | 30 | | |
| 5.2 Mechanická část | 31 | | |
| 5.2.1 Kryt zařízení | 31 | | |
| 5.2.2 Měřicí sonda | 32 | | |
| 5.3 Softwarové řešení | 33 | | |
| 5.3.1 Menu systém | 34 | | |
| 6 Oživení, testování, měření | 35 | | |
| 6.1 Oživení a sestavení zařízení | 35 | | |
| 6.2 Testování funkčnosti analogové části | 36 | | |
| 6.3 Měření jednotlivých rozsahů zařízení | 36 | | |
| 6.3.1 Postup měření | 36 | | |
| 6.3.2 Použité vzorce | 37 | | |
| 6.3.3 Tabulky a grafy | 38 | | |
| 6.3.4 Shrnutí výsledků | 40 | | |
| 6.4 Měření kondenzátorů | 40 | | |
| 6.4.1 Postup měření | 40 | | |
| 6.4.2 Použité vzorce | 41 | | |
| 6.4.3 Tabulky | 41 | | |
| 6.4.4 Shrnutí výsledků | 42 | | |
| 7 Závěr | 43 | | |
| Literatura | 45 | | |
| A Seznam zkratk | 47 | | |
| B Obrázky | 49 | | |
| C Schéma zapojení | 51 | | |
| D Příklad kódu v jazyce C | 55 | | |
| E Návod k obsluze (Samostatná textová publikace) | 59 | | |

Obrázky

| | | | |
|--|----|--|----|
| 2.1 Impedance v komplexní rovině .. | 3 | 5.2 3D model plošného spoje ovládacích prvků | 31 |
| 2.2 Náhradní schéma kondenzátoru (vlevo) paralelní, (vpravo) sériový .. | 4 | 5.3 3D model krytu zařízení | 32 |
| 2.3 Náhradní schéma cívky (vlevo) sériový, (vpravo) paralelní | 5 | 5.4 3D model měřicí sondy | 32 |
| 2.4 VA metoda | 6 | 5.5 3D model sestaveného zařízení .. | 33 |
| 2.5 AV metoda | 7 | 5.6 Menu systém | 34 |
| 2.6 Schéma zapojení metody tří voltmetrů | 7 | 6.1 Foto sestaveného zařízení včetně sondy | 35 |
| 2.7 Schéma zapojení metody tří ampérmetrů | 8 | 6.2 Schéma zapojení měření impedančního analyzátoru | 37 |
| 2.8 Principiální schéma zapojení obecného můstku | 9 | 6.3 Závislost absolutní hodnoty relativní chyby na frekvenci pro nejhorší hodnoty z každého rozsahu | 39 |
| 2.9 Principiální schéma zapojení převodníku impedance na napětí [7] | 10 | 6.4 Závislost absolutní hodnoty relativní chyby na frekvenci pro nejhorší hodnoty z každého rozsahu | 39 |
| 2.10 Blokové schéma nízkofrekvenčního analogového vektorového voltmetru | 11 | 6.5 Schéma zapojení měření kondenzátorů | 40 |
| 2.11 Čtyřsvorkové měření | 12 | 7.1 Rozsahy měření absolutní hodnoty impedance, kde má zařízení relativní chybu měření menší než 1 % | 44 |
| 3.1 Schéma zapojení ESR metru ... | 14 | 7.2 Absolutní chyba měření fáze na příslušných impedančních rozsazích | 44 |
| 3.2 Schéma zapojení Q-metru | 14 | B.1 Plošný spoj ovládacích prvků, přední (vlevo) a zadní (vpravo) strana | 49 |
| 4.1 Blokové schéma zapojení | 17 | B.2 1. verze hlavního plošného spoje přední (vlevo) a zadní (vpravo) strany | 49 |
| 4.2 Napájecí část zařízení | 18 | B.3 2. verze hlavního plošného spoje přední (vlevo) a zadní (vpravo) strany | 50 |
| 4.3 Schéma zapojení obvodu ukazatele stavu nabití akumulátoru | 18 | C.1 Celé schéma zapojení hlavního plošného spoje | 52 |
| 4.4 Zapínání napájení pro celé zařízení | 19 | C.2 Celé schéma zapojení plošného spoje ovládacích prvků | 53 |
| 4.5 Hardwarové periferie mikrokontroléru [5] | 20 | | |
| 4.6 Schéma zapojení převodníku logických úrovní sběrnice SWD ... | 21 | | |
| 4.7 Schéma zapojení zdroje hodin Si5351 | 21 | | |
| 4.8 Schéma zapojení displeje | 22 | | |
| 4.9 Schéma zapojení tlačítek | 23 | | |
| 4.10 Modul displeje SSD1309. [14] .. | 23 | | |
| 4.11 Schéma zapojení SD karty | 24 | | |
| 4.12 Vnitřní blokové schéma zapojení obvodu AD5933 [8] | 26 | | |
| 4.13 Vývojový diagram funkce frequency sweep [8] | 27 | | |
| 4.14 Principiální schéma zapojení vstupní analogové části pro měření střední a velké impedance | 28 | | |
| 5.1 3D model hlavního plošného spoje | 30 | | |

Tabulky

| | |
|--|----|
| 2.1 Srovnání metod měření impedance [4][1] | 12 |
| 4.1 Závislost vstupní frekvence MCLK na rozsahu sinusového signálu. [9] . | 26 |
| 6.1 Impedanční rozsahy | 39 |
| 6.2 Chyba měření fáze | 40 |
| 6.3 Naměřená data pomocí RLCG metru Tesla BM 595 | 41 |
| 6.4 Výsledky měření | 42 |
| 7.1 Impedanční rozsahy měření | 43 |



Kapitola 1

Úvod

Elektrická impedance je rozšířením pojmu elektrický odpor, pro situace, ve kterých se v obvodu objevuje střídavý proud. Jedná se o zdánlivý "odpor", který je kladen střídavému proudu, procházejícím danou součástkou. Elektrický odpor je veličina, která obsahuje pouze jednu složku a je relativně snadné ji měřit. Elektrická impedance se skládá ze dvou složek, reálné a imaginární. Měření impedance je mnohem složitější než u elektrického odporu. S postupným vývojem technologie se zlepšují techniky elektronických měření, mezi které patří i měření impedance. Nové techniky se využívají v širokém spektru různých aplikací, například v medicíně, elektronice, ale i ve strojírenství.

Nejdříve jsem prostudoval metody měření impedance a následně se zabýval návrhem přenosného měřicího přístroje na měření elektrické impedance. Práce začíná návrhem elektrického zapojení a volbou vhodných součástek. Dále práce pokračuje samotnou realizací, tedy tvorbou plošného spoje, výrobou krytu zařízení, osazením plošného spoje, testováním a měřením.

Kapitola 2

Teoretický úvod

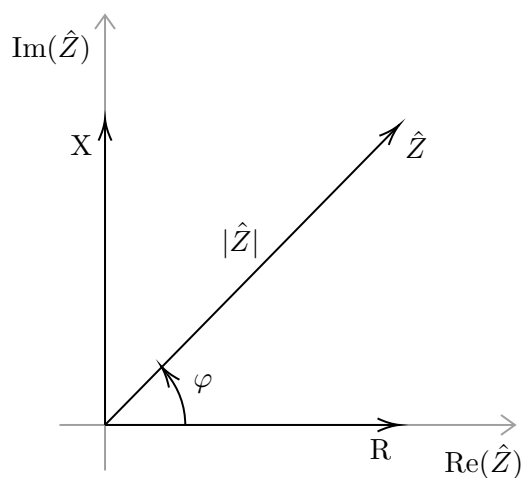
2.1 Impedance

Impedance je důležitý parametr používaný pro charakterizaci elektrických komponent či elektrických obvodů.

Impedance je fyzikální veličina, která se vyjadřuje komplexním číslem a určuje se v harmonickém ustáleném stavu. Impedance tedy popisuje dva parametry součástky, její zdánlivý odpor a fázový posun napětí proti proudu. Impedance se značí jako vektor \hat{Z} . Jednotkou impedance, stejně jako u elektrického odporu, je ohm (Ω). Jde tedy o poměr napětí a proudu.

$$\hat{Z} = \frac{\hat{U}}{\hat{I}} \quad (2.1)$$

Impedance je komplexní veličina a lze ji vyjádřit jako dvě složky, reálnou (rezistence) a imaginární (reaktance). Reálná složka se vynáší na reálnou osu v komplexní (Gaussově) rovině a imaginární složka na imaginární osu v komplexní rovině, která je zobrazena na obrázku. č. 2.1. Impedanci je také možné vyjádřit v polárních souřadnicích, tedy absolutní hodnotou $|\hat{Z}|$ a fázovým posunem φ .



Obrázek 2.1: Impedance v komplexní rovině

Z grafu je vidět, že tedy platí vztah:

$$\hat{Z} = R + jX = |\hat{Z}| \cdot \cos(\varphi) + j|\hat{Z}| \cdot \sin(\varphi) \quad (2.2)$$

Kde R je reálná složka impedance, X je imaginární složka impedance a φ je úhel, který uzavírá vektor impedance s reálnou osou. [3]

2.2 Admitance

Admitance je převrácená hodnota impedance. Značí se písmenem \hat{Y} . Admitance je tedy také komplexní veličina, která se skládá z reálné složky (vodivost) a imaginární složky (susceptance). Jednotkou admitance je Siemens (S). Impedance se nejčastěji využívá pro vyjádření sériové kombinace rezistence a reaktance. Pro paralelní kombinace je jednodušší počítat s admitancí.

$$\hat{Y} = \frac{1}{\hat{Z}} = G + jB \quad (2.3)$$

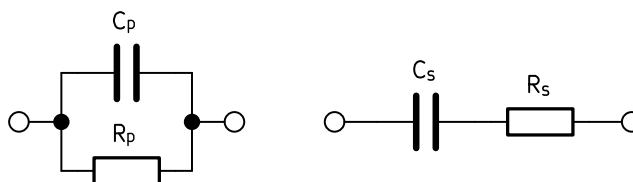
Kde G je vodivost a B je susceptance.

2.3 Náhradní schéma cívky a kondenzátoru

U reálných součástek se vždy vyskytují parazitní vlastnosti. K usnadnění jejich pochopení se zavádí náhradní schéma, které vyobrazuje jak primární, tak parazitní vlastnosti součástek.

2.3.1 Náhradní schéma kondenzátoru

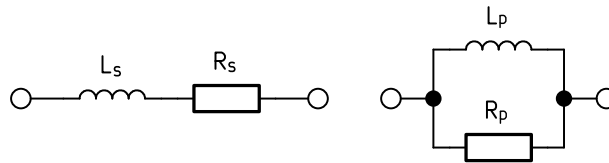
Reálný kondenzátor kromě kapacity C obsahuje ztráty, které způsobují, že při průchodu střídavého proudu dochází ke změně fázového posunu od ideálního stavu. Tyto ztráty jsou způsobeny odporem elektrod, ztrátami v dielektriku při střídavé polarizaci a nedokonalou izolací dielektrika. Ztráty se modelují pomocí ztrátového činitele $tg\delta$. Pro daný kmitočet lze reálný kondenzátor nahradit paralelní nebo sériovou kombinací ideálního kapacitoru a odporu. U tohoto modelu se zanedbává vlastní indukčnost přívodních vodičů a elektrod kondenzátoru. Model je tedy použitelný pro nízké frekvence. Náhradní schémata jsou na obrázku č. 2.2.



Obrázek 2.2: Náhradní schéma kondenzátoru (vlevo) paralelní, (vpravo) sériový

2.3.2 Náhradní schéma cívky

Stejně jako u kondenzátoru, i cívka projevuje parazitní vlastnosti. Připojíme-li reálnou cívku na zdroj střídavého napětí, dochází ke změně fázového posunu od ideálního stavu. Tyto ztráty jsou způsobené rezistivitou materiálu vodiče, ze kterého je cívka navinuta. Další ztráty jsou způsobeny kapacitou mezi závity cívky a mezi závity a zemí. Tyto ztráty se modelují pomocí činitele jakosti Q , ale lze je také modelovat pomocí ztrátového činitele $tg\delta$. Pro daný kmitočet lze reálnou cívku nahradit sériovou nebo paralelní kombinací ideální cívky a odporu. Tento model zanedbává parazitní kapacitní jevy. Náhradní schémata jsou na obrázku č. 2.3.



Obrázek 2.3: Náhradní schéma cívky (vlevo) sériový, (vpravo) paralelní

2.3.3 Dualita obvodů

Duální obvody jsou takové obvody, které mají stejnou impedanci (modul a fázi) při stejném kmitočtu. Pro stejný kmitočet tedy lze vyjádřit paralelní náhradní schéma za sériové a naopak. Vzorce jsou převzaté z [6], kde je odvození.

Přepočítání parametrů sériového náhradního schématu na paralelní:

$$R_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{R_s} \quad X_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{X_s} \quad (2.4)$$

Kde X_s je sériová reaktance, X_p je paralelní reaktance, R_s je sériový odpor a R_p je paralelní odpor.

Přepočítání parametrů paralelního náhradního schématu na sériový:

$$R_s = \frac{R_p \cdot X_p^2}{R_p^2 + X_p^2} \quad X_s = \frac{R_p^2 \cdot X_p}{R_p^2 + X_p^2} \quad (2.5)$$

Kde X_s je sériová reaktance, X_p je paralelní reaktance, R_s je sériový odpor a R_p je paralelní odpor.

2.3.4 Činitel jakosti a ztrátový koeficient

Činitel jakosti se nejčastěji značí písmenem Q a vyjadřuje tzv. míru čistoty reaktance. Popisuje tedy jak moc se jedná o čistou reaktanci. Nejčastěji se využívá u cívek. Činitel jakosti lze vyjádřit:

$$Q = \frac{X}{R} = \frac{B}{G} \quad (2.6)$$

Ztrátový činitel se nejčastěji používá u kondenzátoru a jedná se o poměr rezistence a reaktance. Nejčastěji se značí $tg\delta$. Dá se také vyjádřit jako převrácená hodnota jakosti Q .

$$tg\delta = \frac{R}{X} = \frac{G}{B} = \frac{1}{Q} \quad (2.7)$$

2.4 Metody měření impedance

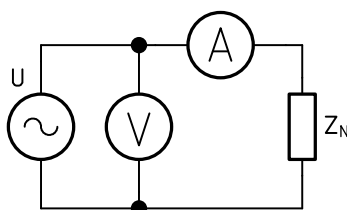
V této sekci jsou popsány některé základní metody měření impedance. Při měření impedance je vždy nutné napájet obvod střídavým harmonickým proudem. Je nutné vždy měřit nejméně dvě různé hodnoty, protože impedance je složena z reálné a imaginární části. Metod pro měření impedance je mnoho. Každá metoda má své výhody a nevýhody. Pro výběr správné metody je nutné brát v potaz faktory jako frekvenční a impedanční rozsah, přesnost a dostupnost měření. Žádná z metod není ideální a je potřeba najít vhodný kompromis na daný požadavek.

2.4.1 Ohmova metoda

Tato metoda je jednou z nejjednodušších, k její realizaci je použit střídavý voltmetr a ampérmetr. Touto metodou je možné zjistit pouze absolutní hodnotu neznáme impedance, ne fázový posun mezi napětím a proudem. Základem této metody je měření napětí a proudu neznámou impedancí, kterou lze následně vyjádřit ze znalosti Ohmova zákona. Protože je nutné měřit napětí i proud současně, jsou možná dvě různá uspořádání. Zvolíme-li vhodnou metodu, můžeme zanedbat chybu měření, způsobenou vnitřními odpory měřicích přístrojů.

VA metoda

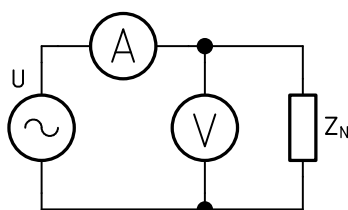
Ve VA metodě zanáší chybu vnitřní odpor ampérmetru A . Voltmetr V měří napětí na sériové kombinaci ampérmetru A a neznáme impedance Z_N . Tato metoda je vhodná pro měření velkých impedancí, kdy vnitřní odpor ampérmetru je mnohem menší než měřená impedance. Schéma zapojení je na obrázku č. 2.4.



Obrázek 2.4: VA metoda

■ AV metoda

V AV metodě zanáší chybu vnitřní odpor voltmetru V. Ampérmetr A měří proud procházející paralelní kombinací voltmetru V a neznámé impedance Z_N . Tato metoda je vhodná pro měření malých impedancí, kdy vnitřní odpor voltmetru je mnohem větší než měřená impedance. Schéma zapojení je na obrázku č. 2.5.



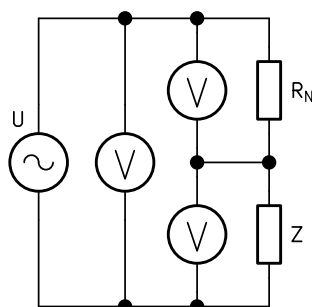
Obrázek 2.5: AV metoda

■ 2.4.2 Srovnávací metody měření

Srovnávací metody měření impedance využívají normálu, u kterého je již známá hodnota komplexní impedance. Nejčastěji se v tomto případě využívá odporový normál. Jeho hodnota impedance se volí tak, aby byla co nejbližší měřené impedanci, tedy aby napětí na normálu i na neznámé impedanci bylo stejné. Mezi tyto metody patří metoda tří voltmetrů a metoda tří ampérmetrů.

Metoda tří voltmetrů

V této metodě je neznámá impedance zapojena do série s odporovým normálem. Měřena jsou celkem 3 napětí. Celkové napětí na sériové kombinaci, napětí na normálu a napětí na neznámé impedanci. Chybu měření zde zanáší vnitřní odpory voltmetrů. Schéma zapojení je na obrázku č. 2.6.



Obrázek 2.6: Schéma zapojení metody tří voltmetrů

Absolutní hodnotu impedance $|\hat{Z}|$ lze vyjádřit ze vztahu:

$$|\hat{Z}| = R_N \frac{U_Z}{U_R} \quad (2.8)$$

Vztah pro výpočet fázového posunu lze odvodit z fázového diagramu:

$$U^2 = U_Z^2 + U_R^2 - 2U_R U_Z \cdot \cos(\varphi') \quad (2.9)$$

Kde U je celkové napětí na sériové kombinaci, U_Z je napětí na neznámé impedanci, U_R je napětí na odporovém normálu a $\varphi' = 180 - \varphi$

Pak lze tedy vyjádřit:

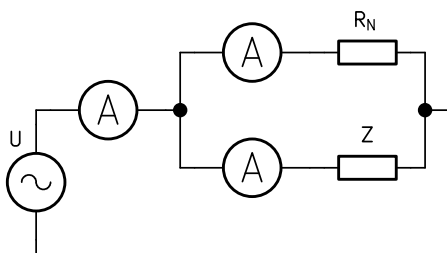
$$\cos(\varphi) = \frac{U^2 - U_Z^2 - U_R^2}{2U_R U_Z} \quad (2.10)$$

Následně lze dopočítat jednotlivé složky impedance (R, X) ze vztahů:

$$R = |\hat{Z}| \cos(\varphi) \quad X = |\hat{Z}| \sin(\varphi) \quad (2.11)$$

Metoda tří ampérmetrů

Metoda je analogická k metodě měření třemi voltmetry. Při měření je neznámá impedance zapojena paralelně k odporovému normálu. Měří se 3 proudy. Proud odporovým normálem, proud neznámou impedancí a celkový proud procházející paralelní kombinací. Měření je nejpřesnější, pokud se absolutní hodnoty proudů měřenou impedancí a odporovým normálem rovnají. Chybu měření zde zanášejí vnitřní odpory ampérmetrů. Schéma zapojení je na obrázku č. 2.7.



Obrázek 2.7: Schéma zapojení metody tří ampérmetrů

Absolutní hodnotu impedance $|\hat{Z}|$ lze vyjádřit ze vztahu:

$$|\hat{Z}| = R_N \frac{I_R}{I_Z} \quad (2.12)$$

Vztah pro výpočet fázového posunu lze odvodit z fázového diagramu:

$$I^2 = I_Z^2 + I_R^2 - 2I_Z I_R \cdot \cos(\varphi') \quad (2.13)$$

Kde I je celkový proud procházející paralelní kombinací, I_Z je proud procházející neznámou impedancí, I_R je proud procházející odporovým normálem a $\varphi' = 180 - \varphi$

Pak lze tedy vyjádřit:

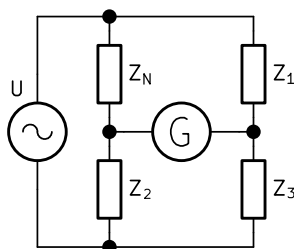
$$\cos(\varphi) = \frac{I^2 - I_Z^2 - I_R^2}{2I_R I_Z} \quad (2.14)$$

Následně lze dopočítat jednotlivé složky impedance (R, X) ze vztahů:

$$R = |\hat{Z}| \cos(\varphi) \quad X = |\hat{Z}| \sin(\varphi) \quad (2.15)$$

2.4.3 Můstkové metody měření

Tyto metody využívají můstkové zapojení, kdy se vyvažují jednotlivá ramena můstku tak, aby na středu můstku bylo nulové napětí. Toho lze docílit pomocí různých kombinací R, L, C součástek nebo dělicího transformátoru. Mezi tyto metody patří zapojení využívající Wheatstoneova můstku (Owenův můstek, Maxwellův-wienův můstek, Wienův můstek, Scheringův můstek, De Sautyho můstek, Fosterův můstek, Campbellův můstek) nebo transformátorových můstků. [4] Principiální schéma zapojení obecného můstku je na obrázku č. 2.8



Obrázek 2.8: Principiální schéma zapojení obecného můstku

2.4.4 Rezonanční metody měření

Tato metoda vychází z Thompsonova vztahu pro výpočet rezonanční frekvence. V rezonanci se obvod chová jako čistě rezistivní (bez reaktance). Pro sériový rezonanční obvod platí, že v rezonanci je impedance nejmenší a proud největší. Opačně to je u paralelního rezonančního obvodu, kde impedance je v rezonanci nejvyšší a proud nejnižší. Těchto jevů se využívá v této metodě měření impedance. Existují různé zapojení využívající tuto metodu. Měření je založené na naladění kombinace známé a neznámé reaktance na jejich rezonanční frekvenci. Toho se dá dosáhnout změnou známé reaktance, nebo změnou kmitočtu zdroje. Po dosažení rezonanční frekvence je nutné odečíst hodnotu známé reaktance a frekvence. Z těchto dat se dá podle Thompsonova vztahu určit neznámá reaktance.

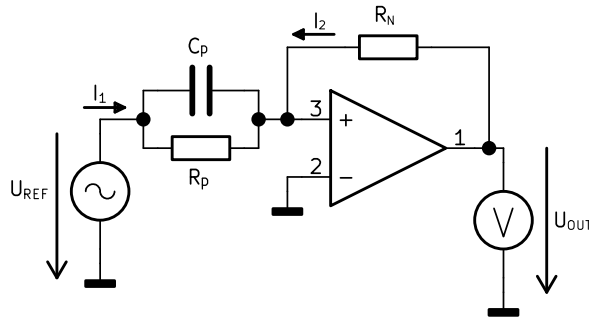
Thompsonův vztah se odvozuje od skutečnosti, že v rezonanci se indukčnice (X_L) a kapacitance (X_C) rovnají. Po odvození vyjde vztah:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.16)$$

Kde f_0 je rezonanční frekvence, L je indukčnosti a C je kapacita prvků v obvodu.

2.4.5 Číslicové metody měření

V dnešní době se nejčastěji využívají číslicové metody měření impedance. Nejčastěji se využívá převodníku admittance na napětí, nebo impedance na napětí. K převodu se využívají operační zesilovače. Principiální schéma zapojení převodníku admittance na napětí je na obrázku č. 2.9. Reálná a imaginární složka výstupního napětí \hat{U}_{OUT} se měří vektorvoltmetrem, kdy napětí U_{REF} je přivedeno na referenční vstup. [7]



Obrázek 2.9: Principiální schéma zapojení převodníku impedance na napětí [7]

Vyjádření admittance

Vyjádření se vztahuje k schématu na obrázku č. 2.9. Vychází se z předpokladů, že proud do vstupů operačního zesilovače je nulový a že reálná složka výstupního napětí $Re(\hat{U}_{OUT})$ je ve fázi s vstupním napětím U_{REF} . [7] Pak platí:

$$\hat{I}_1 = -\hat{I}_2 \quad (2.17)$$

Po dosazení za proudy platí:

$$U_{REF} \cdot \hat{Y} = -\frac{\hat{U}_{OUT}}{R_N} \quad (2.18)$$

Kde \hat{Y} je admittance paralelní kombinace R_p a C_p .

Dále po dosazení za $\hat{Y} = G_X + jB$ platí:

$$G = -\frac{Re(\hat{U}_{OUT})}{U_{REF} \cdot R_N} \quad (2.19)$$

$$B = -\frac{Im(\hat{U}_{OUT})}{U_{REF} \cdot R_N} \quad (2.20)$$

Kde G je vodivost odporu R_p , B je susceptance kondenzátoru C_p ,

Vyjádření prvků paralelního náhradního schématu R_p a C_p :

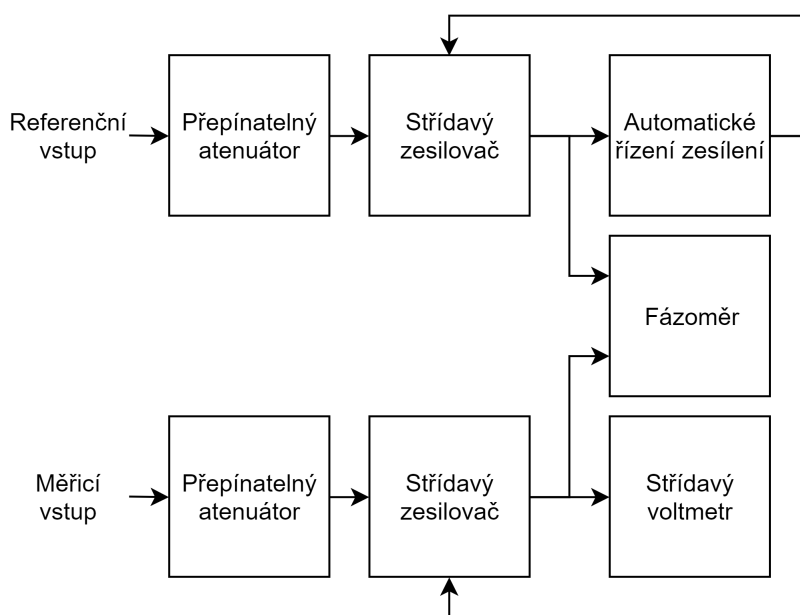
$$R_p = \frac{1}{G} \quad (2.21)$$

$$C_p = \frac{B}{\omega} \quad (2.22)$$

Ze znalosti vzorců pro duální obvody lze vyjádřit prvky pro sériové náhradní schéma. Vzorce jsou uvedeny v kapitole 2.3.3.

■ Vektorový voltmetr

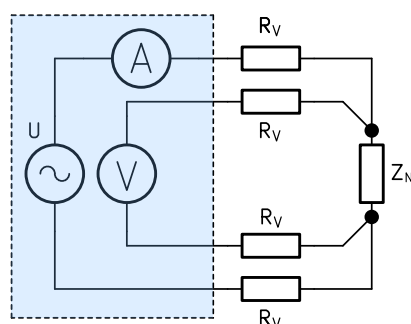
Vektorový voltmetr je hlavní část většiny přístrojů využívající číslicovou metodu měření impedance. Vektorový voltmetr je schopen měřit hladinu dvou napětí a fázový posun mezi nimi. Je nutné, aby obě napětí měly stejný kmitočet. Jedná se tedy o kombinaci střídavého voltmetru a fázoměru. Jeden napěťový vstup se nazývá referenční, ke kterému se fáze vztahuje. Druhý napěťový vstup se nazývá měřicí. Pro měření nízkých a středních kmitočtů se využívají širokopásmové zesilovače a pro vyšší kmitočty se využívají úzkopásmové zesilovače, před kterými je umístěn měnič kmitočtu. Blokové schéma nízkofrekvenčního analogového vektorového voltmetru je na obrázku č. 2.10. [12]



Obrázek 2.10: Blokové schéma nízkofrekvenčního analogového vektorového voltmetru

■ Čtyřsvorkové měření

Přístroje, které využívají číslicové metody měření, využívají dvou či čtyřsvorkového měření neznámé impedance. V případě, že odpory přírodních vodičů a přechodových odporů svorek R_V jsou srovnatelné s absolutní chybou měření impedance, je nutné využít čtyřsvorkové zapojení. Tato metoda využívá 2 páry svorek nazývané proudové a napěťové. Pomocí proudových svorek je do neznámé impedance přiveden proud a pomocí napěťových svorek se měří napětí přímo na neznámé impedanci Z_N . Protože měříme napětí co nejbližší neznámé impedanci, napěťové úbytky způsobené odporem přírodních vodičů a přechodovým odporem svorek se v měření neuplatní. Napěťovými svorkami teče zanedbatelný proud. Úbytky napětí budou tedy také zanedbatelné. Schéma zapojení čtyřsvorkové metody měření je na obrázku č. 2.11.



Obrázek 2.11: Čtyřsvorkové měření

■ 2.4.6 Shrnutí metod měření

V této části jsou srovnány výhody a nevýhody jednotlivých metod měření impedance. Srovnání je uvedeno v tabulce č. 2.1.

Tabulka 2.1: Srovnání metod měření impedance [4][1]

| Metody | Nevýhody | Výhody |
|------------|--|---|
| Srovnávací | <ul style="list-style-type: none"> · potřeba více přístrojů · chyba měření se ve výpočtu násobí | <ul style="list-style-type: none"> · možnost měřit i pro neharmonické periodické průběhy |
| Můstkové | <ul style="list-style-type: none"> · složitější vyvažování · je třeba přesných odporových či kapacitních dekád | <ul style="list-style-type: none"> · dobrá přesnost měření · široký frekvenční rozsah |
| Rezonanční | <ul style="list-style-type: none"> · nutno naladit na rezonanční kmitočet | <ul style="list-style-type: none"> · velmi přesné měření činitele jakosti |
| Číslicové | <ul style="list-style-type: none"> · nepoužitelné pro velmi vysoké kmitočty · nutné dodatečné číslicové zpracování | <ul style="list-style-type: none"> · dobrá přesnost pro široký rozsah impedancí |

Kapitola 3

Popis dostupných přístrojů a používané metody měření

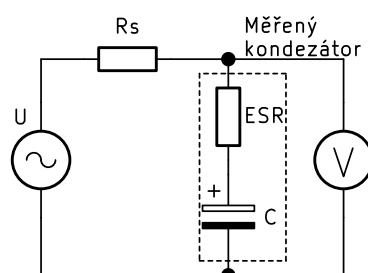
V této kapitole jsou popsány jednotlivé typy měřicích přístrojů a metody, které využívají k měření impedance.

3.1 DMM s měřením kapacit

Ruční digitální multimetry (DMM) se dají částečně řadit mezi tato zařízení. Jejich princip činnosti je odlišný od ostatních typů měřicích přístrojů v této kapitole a jsou také méně přesné. Tyto multimetry umožňují měřit pouze kapacitu, pomocí měření časové konstanty. Do měřeného kondenzátoru je přiveden proud po fixní časový úsek. Po uplynutí tohoto úseku dojde k odměření napětí na kondenzátoru a následuje přepočítání na hodnotu kapacity. Toto měření se s přesností pohybuje okolo jednotek procent a je problémové při měření malých hodnot kapacit. Rozsah měření se pohybuje od jednotek nF po desítky mF. Déle také není možné zjistit jakékoliv parazitní jevy kondenzátorů.

3.2 ESR metr

ESR metr je přístroj, který měří ekvivalentní sériový odpor (ESR) kondenzátoru. Zdroj střídavého napětí je připojen přes rezistor R_s k měřenému kondenzátoru. Většinou se využívá takového kmitočtu, aby bylo možné zanedbat reaktanci. Proud způsobí úbytek napětí na měřeném kondenzátoru. Tento úbytek napětí je z velké části způsobený ESR a z velmi malé části reaktancí. Z hodnot procházejícího proudu a napětí na měřeném kondenzátoru lze ze znalosti Ohmova zákona vyjádřit ESR. Principiální schéma zapojení ESR metru je na obrázku č. 3.1. Tato metoda se nejčastěji používá pro měření elektrolytických kondenzátorů. [13]

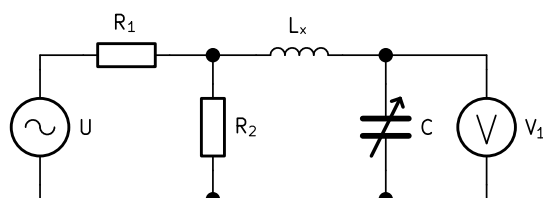


Obrázek 3.1: Schéma zapojení ESR metru

3.3 Q-metr

Q-metr, jak název napovídá, je přístroj na měření činitele jakosti, případně ztrátového činitele. Je zde použita rezonanční metoda. Zjednodušené schéma zapojení je na obrázku č. 3.2. Generátor sinusového signálu U je připojen k rezonančnímu obvodu nejčastěji přes odporový dělič. (Je možné použít i dělič kapacitní.) Rezistor R_2 musí být co nejmenší, protože je součástí měřeného rezonančního obvodu. Sériový rezonanční obvod je tvořen cívkou L_x , kterou měříme a nastavitelným kondenzátorem C . Obvod je do rezonance možné naladit dvěma způsoby a to změnou kapacity C nebo kmitočtu zdroje U . Rezonance se pozná tak, že voltmetr V_1 bude ukazovat největší výchylku. Tento voltmetr je cejchován tak, že přímo ukazuje hodnotu činitele jakosti. [2]

Q-metr se dá použít i pro měření indukčnosti a kapacity. Používá se také k měření ztrátového činitele kondenzátoru.



Obrázek 3.2: Schéma zapojení Q-metru

3.4 LCR metr

LCR metr je z tohoto seznamu první přístroj, který slouží k univerzální charakterizaci impedance. To znamená, že je schopen měřit indukčnost, kapacitu a odpor. Většina dnešních přístrojů používá číslicovou metodu měření, protože lze aplikovat na široký rozsah impedancí. Také není nutné řešit jestli je impedance induktivního charakteru či kapacitního a měření lze snadno automatizovat. Nejčastěji je tedy sinusový signál o dané frekvenci přiveden do neznámé impedance a změří se procházející proud. Z hodnot napětí a proudu lze zjistit fázový posun a absolutní hodnotu impedance a následně určit další parametry. Výpočty lze provést pro sériové či paralelní náhradní schéma. Toto se dá na přístrojích zvolit. LCR metry měří na fixních kmitočtech, mezi kterými lze přepínat. Některé přístroje nabízí 2-15 různých kmitočtů. Nejčastěji

120 Hz a 1 kHz. Některé přístroje využívají pouze dvousvorkového zapojení, které zanáší chybu způsobenou přívodními vodiči. Přesnější přístroje využívají čtyřsvorkové zapojení, které tento problém eliminuje.

■ 3.5 Impedanční analyzátor

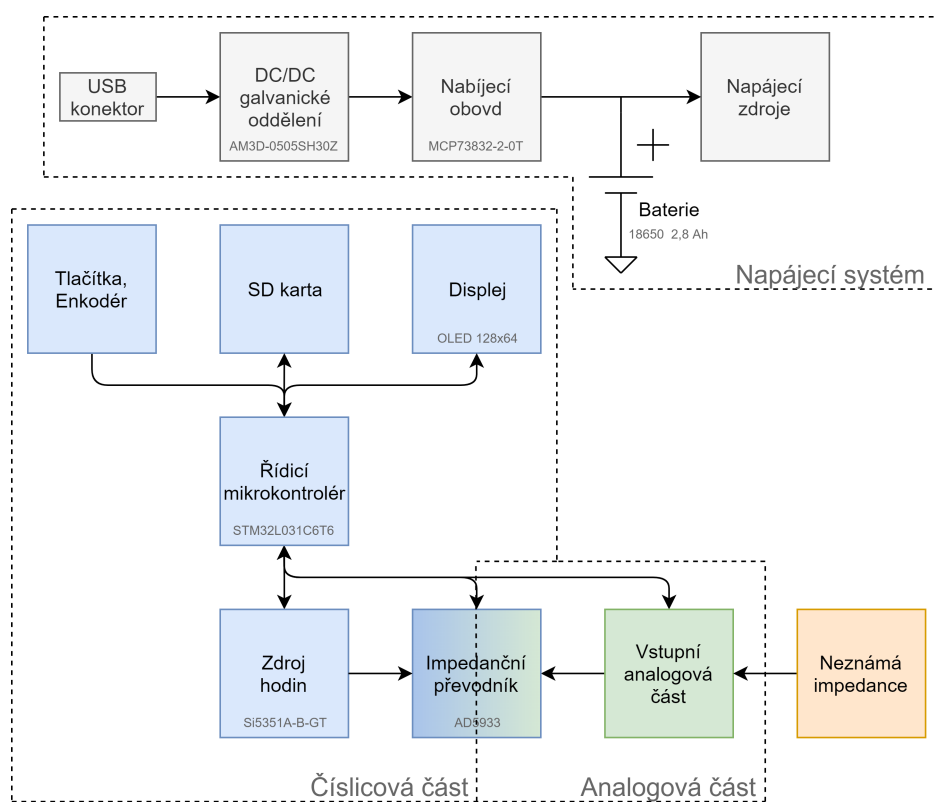
Impedanční analyzátoři jsou v podstatě stejné jak LCR metry. Schodují se v metodě měření a často i v reprezentaci výsledných dat. Impedanční analyzátoři mají oproti LCR metrům navíc funkci rozmítání frekvence. Je tedy možné měřit na libovolně zvolené frekvenci nebo v libovolném rozsahu. V zařízení je tedy možné nastavit frekvenční rozsah měření a krok, po kterém se má měřit. Následně dojde k postupnému odměření dat a k jejich zobrazení jako graf, či uložení dat k dalšímu zpracování uživatelem.

Kapitola 4

Návrh řešení

Tato kapitola je věnována návrhu zařízení. Jsou zde popsány základní bloky, které tvoří celé zařízení. Poslední část je věnována mechanickému zpracování zařízení.

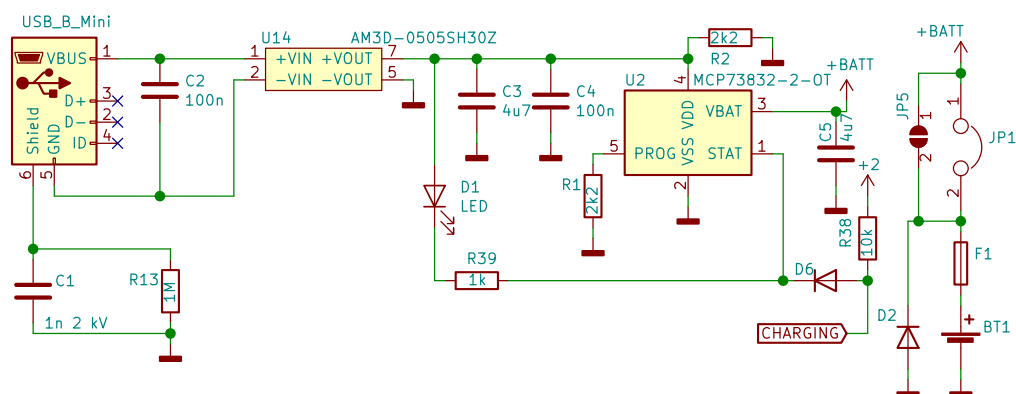
Elektrická část celého zařízení se dá rozdělit do třech základních částí. První část, je část napájecí, která zařizuje napájení pro celé zařízení. Druhá část, je část číslicová, která řeší komunikaci s uživatelem a řízení celého zařízení. Třetí část, je část analogová, která obsahuje impedanční převodník a vstupní analogovou část. Blokové schéma je na obrázku č. 4.1.



Obrázek 4.1: Blokové schéma zapojení

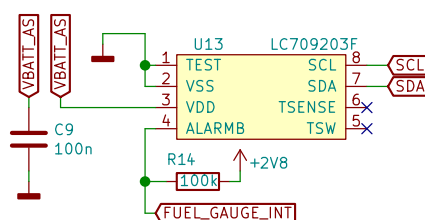
4.1 Napájecí část

Celé zařízení je napájeno z lithium iontového akumulátoru BT1 18650 o nominální kapacitě 2800 mAh a s integrovanou ochranou elektronikou. Nabíjení tohoto akumulátoru řeší obvod MCP73832-2-0T, který je schopen nabíjet akumulátor proudem až 500 mA. Akumulátor je nabíjen pomocí portu USB. Za USB portem je galvanicky oddělený DC/DC měnič (AM3D-0505SH30Z), který zařizuje oddělení přístroje od země USB přívodu. Toto oddělení je nutné, protože hrozí, že měřený objekt bude uzemněný a dojde buď ke zkratu zařízení, nebo k zemním smyčkám. Dále bude také možné měřit jen na akumulátor, ne při nabíjení. Akumulátor je chráněn pojistkou F1 proti překročení proudu a zkratu. Zařízení je dále chráněno proti přepólování akumulátoru diodou D2, která se v tu chvíli stane vodivá a zkratuje akumulátor. Tento zkrat rozpojí pojistka F1. Schéma zapojení napájecí části je na obrázku č. 4.2. Za akumulátorem následuje obvod, který řeší zapínání napájení pro celé zařízení, který je popsán podrobněji v podkapitole 4.1.1.



Obrázek 4.2: Napájecí část zařízení

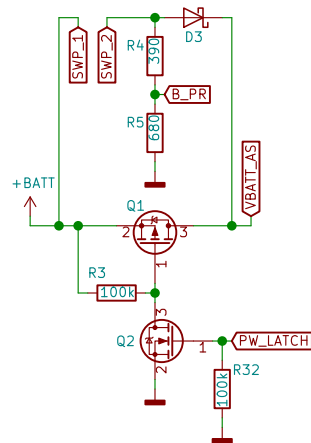
Sledování stavu akumulátoru řeší obvod ukazatele stavu nabití akumulátoru LC709203F od firmy ON Semiconductor v pouzdře WDFN8, který měří napětí na akumulátoru a počítá zbývající kapacitu akumulátoru v procentech. Tyto informace vyčte mikrokontrolér z tohoto obvodu pomocí sběrnice I²C. Schéma zapojení je na obrázku č. 4.3.



Obrázek 4.3: Schéma zapojení obvodu ukazatele stavu nabití akumulátoru

4.1.1 Uvedení do provozu

Celé zařízení je v klidovém stavu odpojeno od napájení pomocí unipolárního tranzistoru Q1, který je držen zavřený rezistorem R3. Pokud se stiskne tlačítko zapínání (spojení kontaktu SWP_1 a SWP_2), začne procházet proud Schottkyho diodou D3 a dojde k zapnutí zařízení. Mikrokontrolér, ihned po připojení napájení, nastaví PW_LATCH do logické jedničky, čímž dojde k otevření tranzistoru Q2, který otevře tranzistor Q1. Přestane tedy procházet proud Schottkyho diodou D3. Po opětovném stisknutí zapínacího tlačítka (spojení kontaktu SWP_1 a SWP_2), dojde k přivedení napětí na napěťový dělič R4, R5. Mikrokontrolér, který sleduje napětí na odporu R5 (B_PR) vyhodnotí, že došlo ke stisknutí tlačítka a zahájí ukončování procesů, vypínání zařízení a jako poslední stáhne PW_LATCH do logické nuly. Tím zavře tranzistor Q2, který zavře tranzistor Q1 a dojde k odpojení napájení celému zařízení. Schéma zapojení je na obrázku č. 4.4.



Obrázek 4.4: Zapínání napájení pro celé zařízení

4.1.2 Části napájecího systému

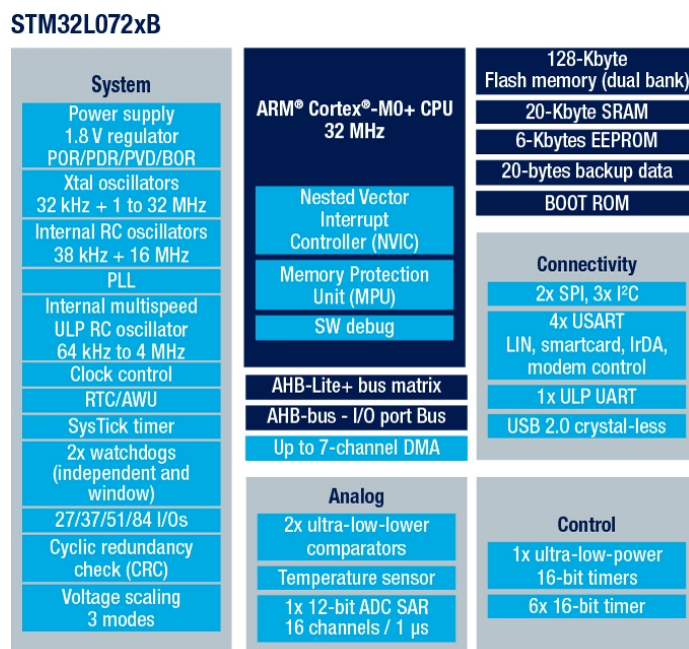
Napětí z akumulátoru musí být následně upraveno tak, aby bylo možné napájet ostatní části zařízení. Napájecí napětí celého zařízení jsem sjednotil na 2,8 V. Dále bylo nutné oddělit napájení analogové a číslicové části zařízení. Dojde tak k potlačení rušení analogové části, částí číslicovou. Doporučuje to tak i výrobce impedančního převodníku AD5933. Celkem jsou zde tři lineární stabilizátory, jeden napájí část číslicovou, druhý napájí jen analogovou část a třetí je pro napájení displeje, který je také možno úplně odpojit od napájení pomocí tranzistoru, řízeného mikrokontrolérem. Z důvodu potlačení rušení byly zvoleny lineární stabilizátory místo účinnějších DC/DC měničů. DC/DC měnič na výstupu vždy generuje zvlnění, které by mohlo ovlivnit výsledky měření.

4.2 Číslicová část

Číslicovou část tvoří několik částí. Hlavní část tvoří řídicí mikrokontrolér, který řeší obsluhu celého zařízení. Další bloky tvoří displej, SD karta, zdroj přesného hodinového signálu pro impedanční převodník a další podpůrné obvody. Jednotlivé bloky jsou popsány v podkapitolách níže.

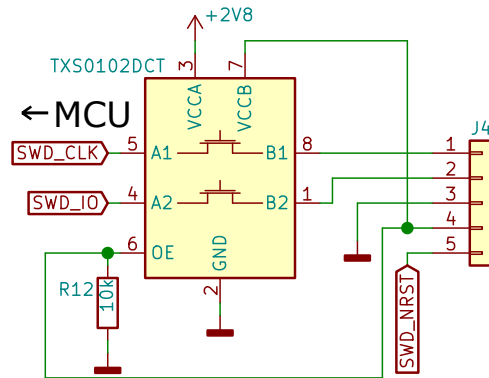
4.2.1 Řídicí mikrokontrolér

Nejdříve jsem zvolil jako hlavní řídicí mikrokontrolér STM32L031C6T6 v pouzdře LQFP48 od firmy STMicroelectronics. Díky malé FLASH paměti (jen 32 kB) jsem musel mikrokontrolér změnit na STM32L072CBT6. Obvod disponuje FLASH pamětí o velikosti 128 kB, která dostačuje na potřeby tohoto zařízení. Tento mikrokontrolér je postaven na architektuře ARM Cortex-M0+. Jedná se o 32-bitové jádro s dvoustupňovým pipeliningem postaveným na von Neumannově architektuře. Mikrokontrolér dosahuje výkonu až 30,4 DMIPS při maximálním možném kmitočtu 32 MHz. Hlavní důvod volby tohoto mikrokontroléru byl jeho poměr cena a velikost programové paměti. Dále tento mikrokontrolér obsahuje 20 kB paměti RAM, díky které zápis na SD kartu nebude muset být tak častý a většina měření a výpočtů se může provést najednou. Další důležitou součástí je hardwarová podpora sběrnic I²C a SPI, které jsou potřebné pro tuto aplikaci.[5] Na obrázku č. 4.5 je seznam hardwarových periférií, kterými mikrokontrolér disponuje.



Obrázek 4.5: Hardwarové periférie mikrokontroléru [5]

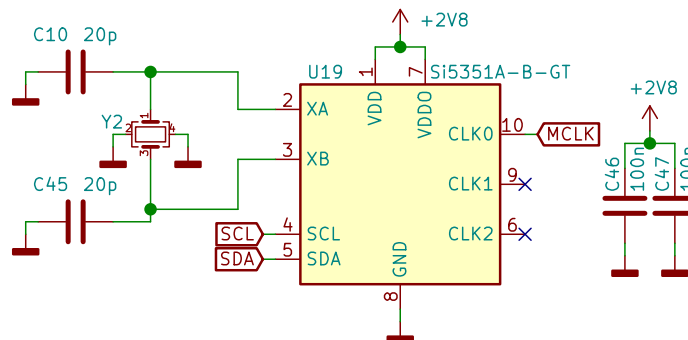
Tento mikrokontrolér je programován pomocí sběrnice SWD. Napájecí napětí celého zařízení je 2,8 V, ale programátor ST-Link v2 používá 3,3 V logiku. Je tedy nutné zde použít převodník logických úrovní. Zvolil jsem obvod TXS0102 v pouzdře SSOP-8 od firmy Texas Instruments. Jedná se o dvoubitový oboustranný převodník logických úrovní, který jsem použil na signál CLK a IO sběrnice SWD. Schéma zapojení je na obrázku č. 4.6.



Obrázek 4.6: Schéma zapojení převodníku logických úrovní sběrnice SWD

4.2.2 Zdroj hodinového signálu

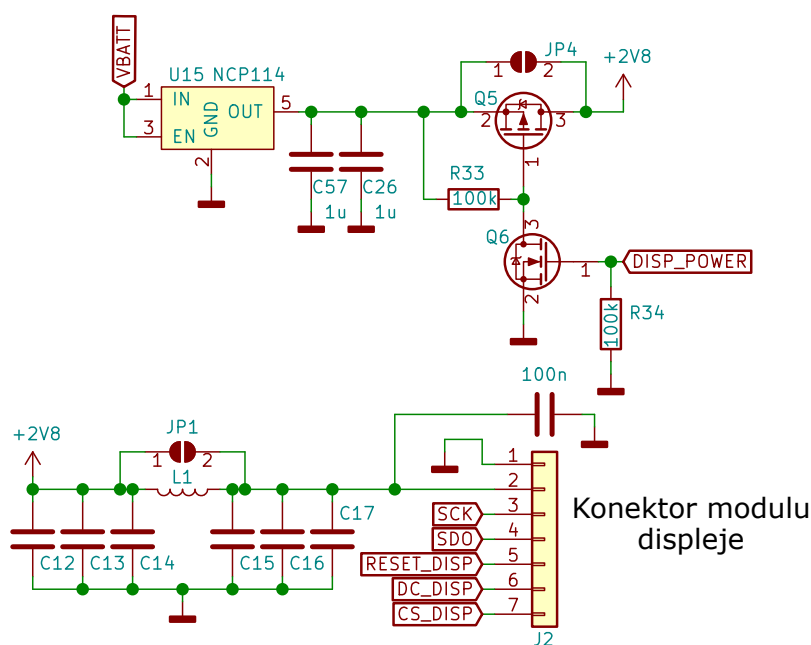
Zdrojem hodinového signálu pro impedanční převodník AD5933 je obvod Si5351A v pouzdře 10-MSOP. Jedná se o plně programovatelný zdroj obdélníkového signálu, který je schopen díky interním fázovým závěsům a děličkám nastavit přesný kmitočet v rozsahu od 2,5 kHz do 200 MHz. Zdrojem frekvence pro tento obvod je krystal o frekvenci 25 MHz. Lze použít až tři nezávislé generátory. V této aplikaci je použitý pouze jeden z nich. Obvod se nastavuje pomocí sběrnice I²C. Schéma zapojení je na obrázku č. 4.7. Kde vývod MCLK vede do impedančního analyzátoru na pin 8 (MCLK).



Obrázek 4.7: Schéma zapojení zdroje hodin Si5351

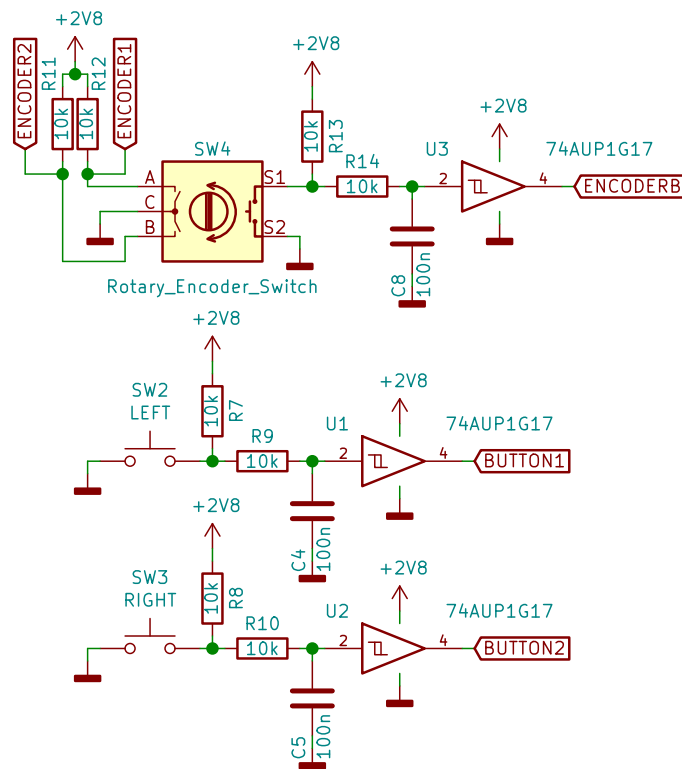
4.2.3 Ovládání - displej, tlačítka

Displej, tlačítka, enkodér a informační LED budou umístěny na separátním plošném spoji. Displej jsem zvolil grafický s rozlišením 128x64 technologie OLED. Modul je znám pod názvem ssd1309. Uhlopříčka displeje je 2,42 palce. Jedním z důvodů volby tohoto displeje je technologie OLED, která disponuje vysokým kontrastem a tedy velmi dobrou čitelností za zhoršených podmínek. Nevýhoda tohoto displeje je velká spotřeba, ale v tomto případě to není tak kritické. Modul je na obrázku č. 4.10. Modul obsahuje DC/DC měnič, což umožňuje napájení již od 2,8 V. Bohužel tento měnič má velké zvlnění napětí a ruší zpět do svého napájení. Toto rušení by snadno mohlo proniknout do analogové části zařízení. Oddělil jsem tedy displej tak, že je možné pomocí tranzistoru zapínat a vypínat napájení celému modulu pomocí mikrokontroléru. Dále je také možné použít filtr, který jsem přidal do cesty napájení k displeji. Schéma zapojení je na obrázku č. 4.8. Toto zapojení je rozděleno mezi dva plošné spoje.

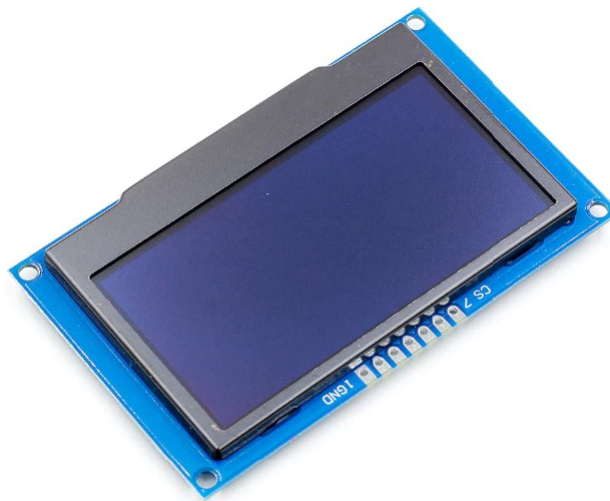


Obrázek 4.8: Schéma zapojení displeje

Celkem jsou v zařízení umístěny dvě tlačítka (vyjma zapínacího tlačítka) a enkodér, který je možné stisknout jako další tlačítko. Tato konfigurace je dostačující pro ovládání celého zařízení. Každé tlačítko je ošetřeno proti překmitům pomocí Schmittova klopného obvodu a RC článků. Tímto způsobem bude zajištěno, že nebude nutné řešit zákmity pomocí programu. Schéma zapojení tlačítek je na obrázku č. 4.9.



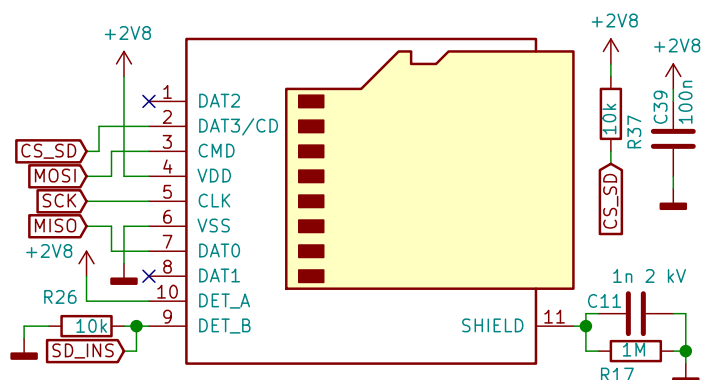
Obrázek 4.9: Schéma zapojení tlačítek.



Obrázek 4.10: Modul displeje SSD1309. [14]

4.2.4 SD karta

Micro SD karta v zařízení bude sloužit pro export naměřených dat v textovém formátu CSV. Naměřená data bude tedy dále možné zpracovat pomocí programů jako je Microsoft Excel nebo Matlab. SD karta je připojena k řídicímu mikrokontroléru pomocí sběrnice SPI. Jedná se o využívané připojení SD karty a také jediné možné použití této technologie pod volnou licenci. Je tedy nutné, aby SD karta byla formátována v souborovém systému FAT. Vložení a vyjmutí SD karty je detekováno pomocí přepínače umístěného ve slotu karty, který je monitorován řídicím mikrokontrolérem. Schéma zapojení je na obrázku č. 4.11



Obrázek 4.11: Schéma zapojení SD karty

4.3 Analogová část

Analogová část je tvořena celkem ze dvou základních bloků. Prvním blokem je samotný impedanční převodník AD5933, který řeší generování sinusového signálu a následně převod analogového signálu na reálnou a imaginární složku impedance. Druhý blok je vstupní analogová část, která obsahuje analogové zpracování signálů a kalibrační rezistory.

4.3.1 Impedanční převodník AD5933

Základem celé analogové části analyzátoru je impedanční převodník AD5933 od firmy Analog Devices v pouzdře SSOP16. Blokové schéma převodníku je na obrázku č. 4.12. Převodník obsahuje digitálně analogový převodník (DAC) pomocí kterého generuje sinusový signál o uživatelem zvoleném kmitočtu. Rozsah tohoto kmitočtu je dán zdrojem hodin obvodu. Lze použít interní oscilátor, který má kmitočet 16,776 MHz. Tento oscilátor dovoluje nastavení výstupního sinusového kmitočtu v rozsahu od 1 kHz do 100 kHz. AD5933 má možnost přepnout na externí vstup hodinového signálu (MCLK), pomocí kterého je možné dosáhnout nižších kmitočtů výstupního sinusového signálu. Jednotlivé rozsahy jsou uvedeny v tabulce č. 4.1. Nejčastější použití převodníku je ve funkci sweep, kdy se nastaví počáteční podmínky a spustí měření. [8]

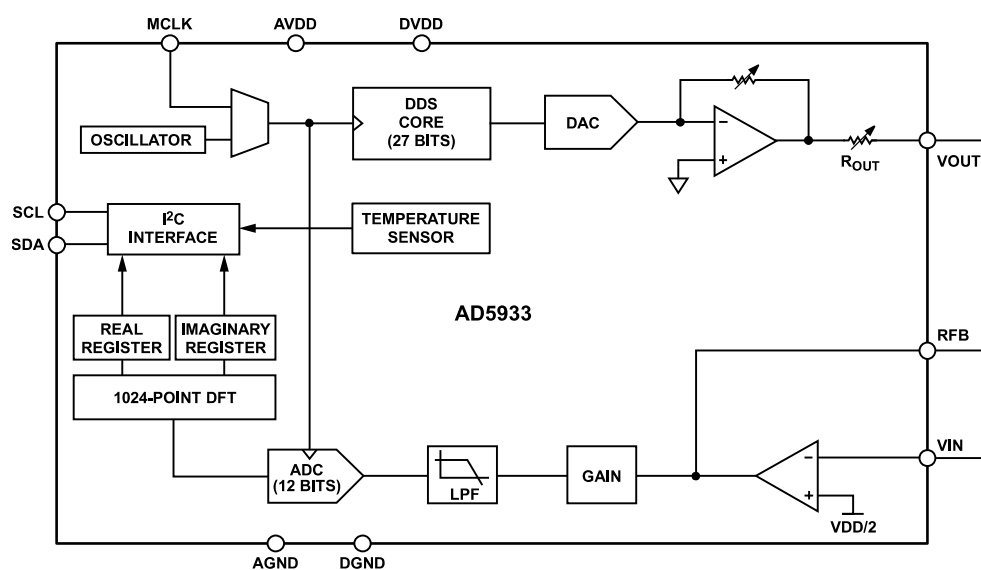
Impedanční převodník se nastavuje pomocí interních registrů, které se nastavují přes sběrnici I²C. Pro funkčnost převodníku je nutné pracovat s těmito registry:

- **Start frequency** - Tento registr slouží k nastavení startovní frekvence funkce sweep. Z důvodu možnosti připojení různé frekvence zdroje referenčních hodin, je zde nutné použít přepočtení pomocí vzorce:

$$\text{Hodnota registru} = \frac{f}{\frac{f_{\text{CLOCK}}}{4}} \cdot 2^{27}$$

Kde f je chtěná frekvence sinusového signálu a f_{CLOCK} je frekvence zdrojového signálu hodin.

- **Frequency increment** - Tento registr slouží k nastavení kroku, podle kterého se inkrementuje jeden krok. Vzorec pro přepočtení je stejný jako u Start frequency registru.
- **Number of increments** - Hodnota toho registru přímo říká, kolik kroků se má provést.
- **Control** - Tento registr slouží k nastavení režimu převodníku a také k samotnému krokovému měření. Také se pomocí tohoto registru nastavuje hodnota výstupního napětí sinusového signálu.
- **Number of settling time cycles** - Tento registr slouží k nastavení počtu period výstupního sinusového signálu, které se nechají nejdříve projít měřenou impedancí, než dojde k odměření.
- **Status** - Tento registr slouží k informaci, zda právě probíhá měření, proběhlo měření a pod. [8]



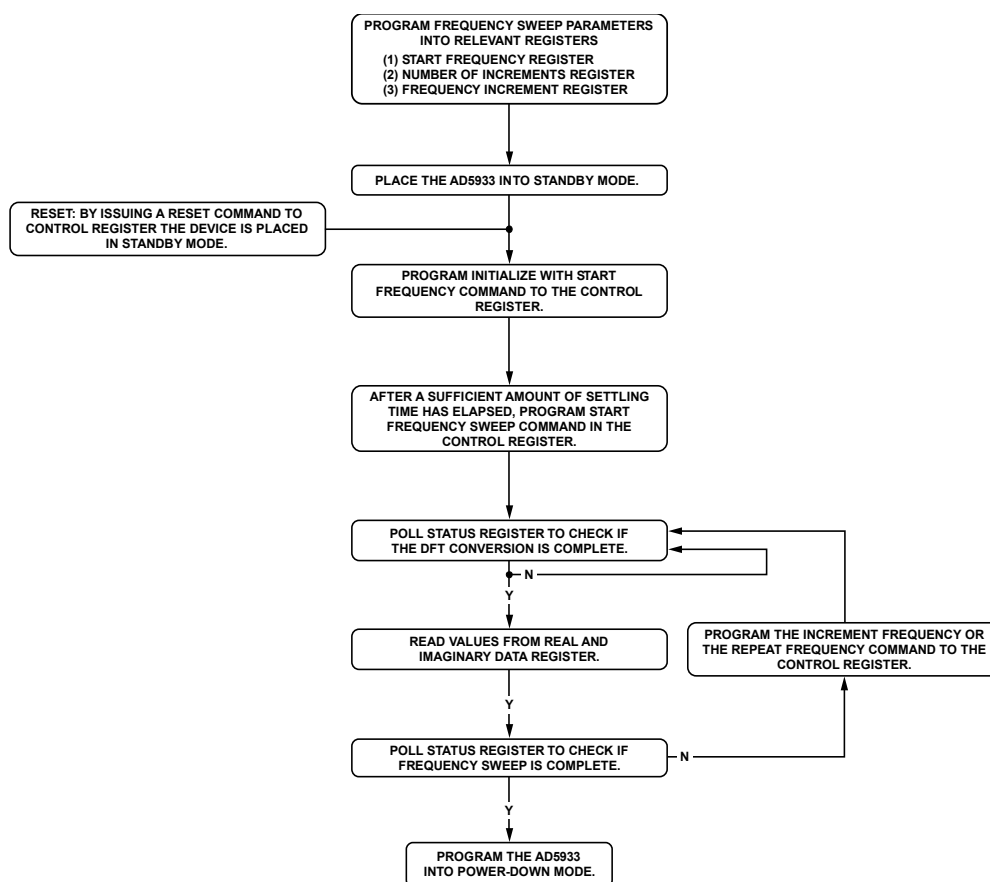
Obrázek 4.12: Vnitřní blokové schéma zapojení obvodu AD5933 [8]

Tabulka 4.1: Závislost vstupní frekvence MCLK na rozsahu sinusového signálu. [9]

| AD5933 Sweep Range | MCLK Frequency |
|-----------------------|----------------|
| 100 kHz - 20 kHz | 16 MHz |
| 20 kHz - 10 kHz | 12 MHz |
| 10 kHz - 5 kHz | 6 MHz |
| 5 kHz - 2,5 kHz | 3 Mhz |
| 2,5 kHz - 1,25 kHz | 1,5 Mhz |
| 1,25 kHz - 625 Hz | 750 kHz |
| 625 Hz - 312,5 Hz | 375 kHz |
| 312,5 Hz - 156,25 Hz | 187,5 kHz |
| 156,25 Hz - 78,125 Hz | 93,75 kHz |
| 78,125 Hz - 39,125 Hz | 46,875 kHz |
| 39,125 Hz - 19,53 Hz | 23,437 kHz |
| 19,53 Hz - 9,76 Hz | 11,71 kHz |

■ Provedení frequency sweep

Celý proces začíná nastavením registrů Start frequency, Number of increments a Frequency increment. Po nastavení těchto registrů je možné spustit sweep. Dále je nutné převodník přepnout do standby režimu. Následně příkazem "start frequency command" do Control registru se spustí měření. Převodník začne generovat sinusový signál a počká daný počet period, které jsou nastavené v registru Number of settling time cycles. Po uplynutí těchto period provede měření a uloží data do výstupních registrů. Převodník následně čeká na přečtení dat uživatelem. Po přečtení dat je nutné odeslat příkaz "increment frequency" (nebo "repeat frequency") aby došlo k nastavení nové frekvence a cyklus se opakuje.[8] Celý vývojový diagram je na obrázku č. 4.13.



Obrázek 4.13: Vývojový diagram funkce frequency sweep [8]

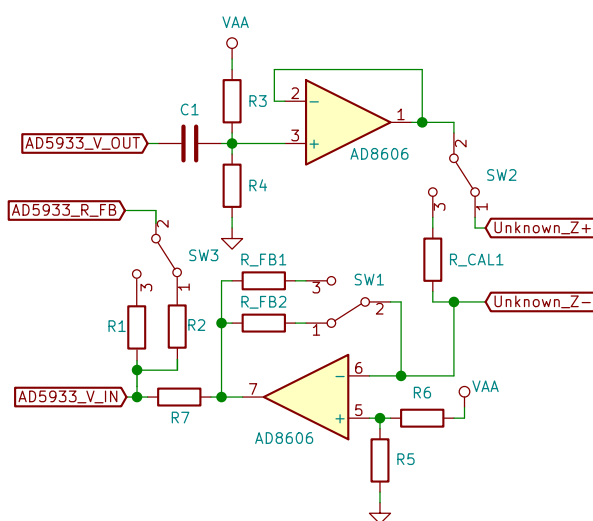
4.3.2 Vstupní analogová část

Vstupní analogová část řeší měření střední a velké impedance (100 Ω - 1 M Ω).

Na obrázku č. 4.14 je pouze principiální schéma zapojení. Zapojení vychází z principiálního zapojení z aplikačního manuálu impedančního převodníku AD5933.[10] Reálné schéma zapojení by bylo velmi nepřehledné, proto v této kapitole bylo zjednodušeno. Celé schéma zapojení je uvedeno v příloze na obrázku č. C.1.

Sinusový signál generovaný impedančním převodníkem AD5933 je přiveden na kondenzátor C1, který odfiltruje stejnosměrnou složku signálu generovanou převodníkem. Střídavý signál se přičte k stejnosměrné složce tvořené odporovým děličem R3 a R4. Tyto rezistory mají stejnou hodnotu a jsou velmi přesné (0,05 %). VAA je napájecí napětí 2,8 V. Stejnosměrná složka je tedy polovina napájecího napětí (1,4 V). Aby nedocházelo k zatěžování odporového děliče tak následuje napěťový sledovač tvořený operačním zesilovačem AD8606. Výstup ze sledovače je přiveden do několika analogových prepínačů ADG849, které jsou ve schématu reprezentovány prepínačem SW2. Tyto prepínače zařizují přepojování mezi měřenou neznámou impedancí (svorky Unknown_Z+ a Unknown_Z-) a přesnými kalibračními rezistory (R_CAL).

Jako další v cestě signálu je převodník proudu na napětí, který je také tvořen operačním zesilovačem AD8606. Převodník je napětově opět vztažen k polovině napájecího napětí pomocí napětového děliče tvořeného rezistory R5 a R6. Ve zpětné vazbě tohoto zesilovače je opět analogový přepínač, reprezentovaný přepínačem SW1 a dvěma rezistory (R_FB), pomocí kterých se nastavuje impedanční rozsah měření. (Mění se zesílení převodníku proud na napětí.) Za tímto převodníkem následují rezistory (R7, R1 a R2), které jsou zapojeny tak, že operační zesilovač, který je integrován v impedančním převodníku AD5933, je zapojen jako invertující zesilovač. Analogovým přepínačem SW3 lze volit ze dvou rezistorů (R1 a R2) ve zpětné vazbě toho zesilovače a lze tedy nastavit dvě různé hodnoty zesílení. Signál je po cestě invertován celkem dvakrát, jednou v převodníku napětí na proud a podruhé v tomto zesilovači.



Obrázek 4.14: Principiální schéma zapojení vstupní analogové části pro měření střední a velké impedance

Kapitola 5

Realizace

V této kapitole je popsána realizace funkčního vzorku impedančního analyzátoru. Kapitola obsahuje samotný návrh plošného spoje, 3D tisk potřebných dílů do mechanické části a programování firmwaru zařízení.

5.1 Plošný spoj

Celkem je zařízení rozděleno do dvou plošných spojů. Hlavní plošný spoj, který obsahuje veškeré důležité části zařízení. Druhý plošný spoj je tvořen displejem, tlačítky, enkodérem, indikační LED a podpůrnými obvody. Plošné spoje jsem navrhoval v programu KiCad. Jednalo se o můj první návrh čtyřvrstvého plošného spoje a také první návrh složitější analogové části. Celkem vznikly dvě verze hlavního plošného spoje a jedna plošného spoje ovládacích prvků. První verze sloužila na odladění analogové části a vyzkoušení, že vše funguje tak, jak bylo navrženo. Ve druhé verzi došlo k zjednodušení analogové části, výměně hlavního řídicího mikrokontroléru a odstranění chyb, které se objevily v první verzi. Všechny plošné spoje jsem nechal vyrobit společností JLCPCB.COM v Číně. První verze hlavního plošného spoje má rozměry 74 mm × 96 mm a stála 28 \$. Druhá verze, i když měla rozměry větší (80 mm × 100 mm), stála jen 7 \$. Mezi objednávkami došlo ke změně ceníku.

5.1.1 Hlavní plošný spoj

Verze č. 1

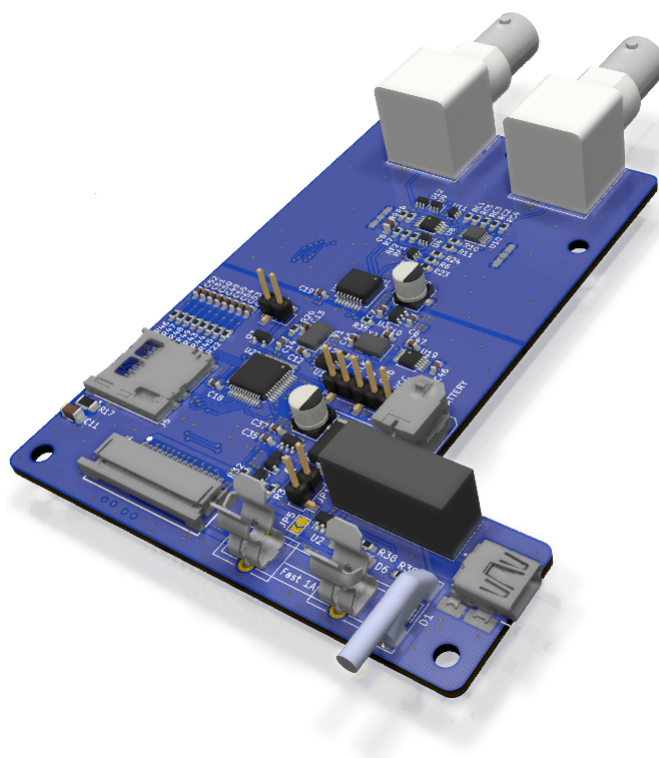
Tento plošný spoj je čtyřvrstvý, kdy vnitřní vrstvy obsahují zem a napájení. Základní šířku cest jsem zvolil 0,2 mm z důvodu úspory místa na plošném spoji. Pro napájení jednotlivých bloků jsem volil širší cest od 0,3 mm - 0,8 mm.

V horní části plošného spoje se nachází analogová část, kterou je možné zakrýt kovovým stíněním. Stínění slouží k zamezení rušení z okolí. Tato část má širší cesty, pro docílení nižšího odporu v cestě měření. Napájecí část je umístěna v pravé dolní části, kde je umístěn i konektor USB. Na zbytku plošného spoje se rozkládá číslicová část, konektor na programování mikrokontroléru a na levé straně slot na SD kartu. V dolní části je také umístěn

konektor na připojení plošného spoje ovládacích prvků. Foto neosazeného plošného spoje je v příloze na obrázku č. B.2.

■ Verze č. 2

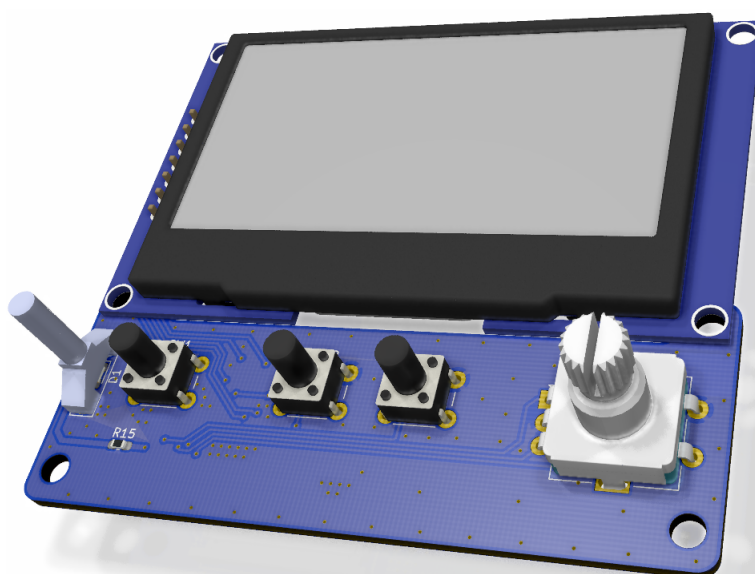
V této verzi jsem upravil velikost plošného spoje tak, aby se do výřezu dalo vsadit pouzdro na akumulátor tak, aby společně tvořili obdélník. Je tedy mnohem jednodušší vše umístit do krytu zařízení. Dále jsem přidal konektory BNC přímo na plošný spoj, což umožní snazší implementaci do krytu zařízení. Došlo k zjednodušení analogové části a zmenšení její plochy na plošném spoji. 3D model je na obrázku č. 5.1. Foto neosazeného plošného spoje je v příloze na obrázku č. B.3.



Obrázek 5.1: 3D model hlavního plošného spoje

■ 5.1.2 Plošný spoj ovládacích prvků

Plošný spoj ovládacích prvků je připojen pomocí flex kabelu k hlavnímu plošnému spoji. Tento plošný spoj je dvouvrstvý, protože zde není žádná kritická část zařízení. V pravé části je výstupek, který slouží k připojení displeje. V pravé části je umístěn enkodér, uprostřed dvě tlačítka a vlevo je tlačítko sloužící k zapínání zařízení a indikační LED. Na zadní části plošného spoje jsou umístěny ostatní obvody. 3D model včetně osazeného displeje je na obrázku č. 5.2. Foto neosazeného plošného spoje je v příloze na obrázku č. B.1.



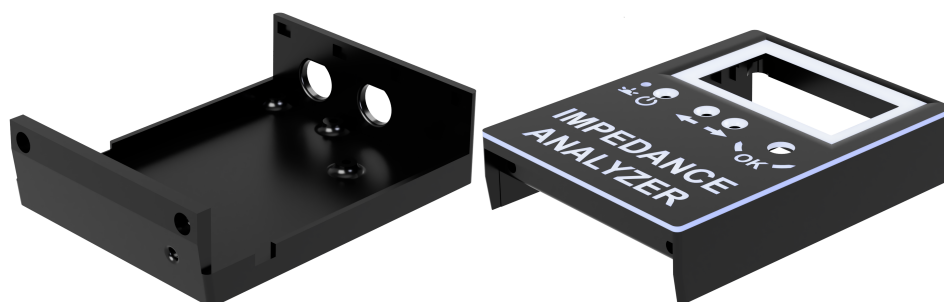
Obrázek 5.2: 3D model plošného spoje ovládacích prvků

■ 5.2 Mechanická část

Oba plošné spoje jsou v krytu umístěny nad sebou. Na vrchu zařízení je umístěn plošný spoj ovládacích prvků, který je přímo přidělán do vrchního krytu. V dolní části zařízení je hlavní plošný spoj společně s akumulátorem. Kryt je podrobněji popsán níže.

■ 5.2.1 Kryt zařízení

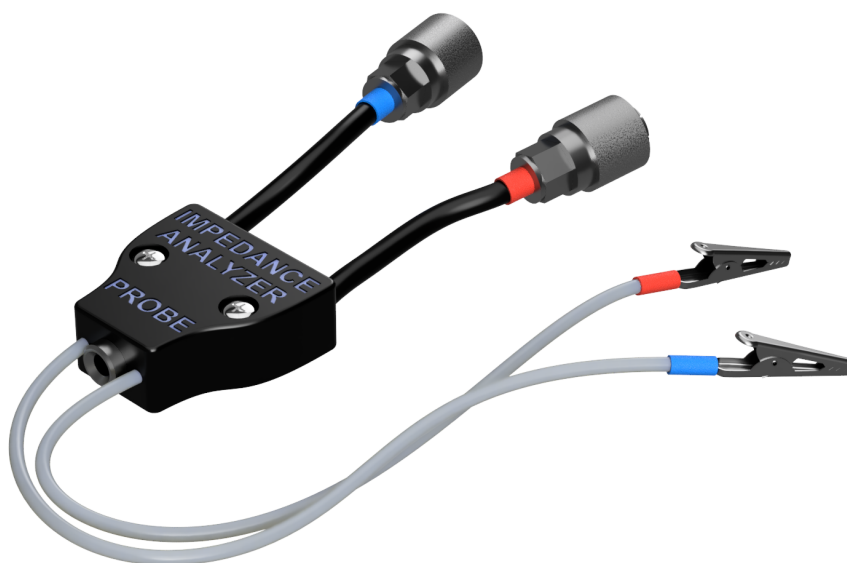
Kryt, ve kterém je zařízení umístěno byl vytištěn na 3D tiskárně Original Prusa i3 MK2. Tisk krytu trval přibližně 8 hodin z materiálu ABS. V průběhu tisku jsem vyměnil barvu filamentu, aby byli jasně čitelné popisky tlačítek. K modelování jsem použil program Fusion 360 od firmy AutoDesk. Kryt je rozdělen do dvou částí. V dolní části je umístěn akumulátor a hlavní plošný spoj, který je připevněn přímo do krytu. Konektory BNC jsou umístěny tak, že přesahují ven z krytu a jsou zajištěny maticí do krytu, aby nedocházelo k namáhání plošného spoje při manipulaci s konektory. Do horní části je připevněn plošný spoj ovládacích prvků společně s displejem. Obě části jsou k sobě na jedné straně nasazené a na druhé staženy pomocí šroubů. Tyto šrouby nejsou přímo do plastu, ale jsou zde kovové závitové vložky. Flex kabel, který oba plošné spoje spojuje, dovoluje snadné otevření zařízení. Případný servis či výměna akumulátoru je tedy snadno proveditelná. 3D model krytu je na obrázku č. 5.3.



Obrázek 5.3: 3D model krytu zařízení

■ 5.2.2 Měřicí sonda

K přístroji jsem dále navrhl a zkonstruoval měřicí sondu. Sonda funguje jako redukce mezi konektory BNC a krokosvorky, pomocí kterých lze snadno měřenou součástku připojit k analyzátoru. Jsou zde použity stíněné vodiče až po krokosvorky. Tímto jsou vodiče stíněny od rušení z okolí co nejlépe. Dále je možno pomocí 4 mm banánku, který lze vsunout do zdířky v krytu sondy, připojit stínění k měřenému objektu. 3D model sondy je na obrázku č. 5.4.



Obrázek 5.4: 3D model měřicí sondy



Obrázek 5.5: 3D model sestaveného zařízení

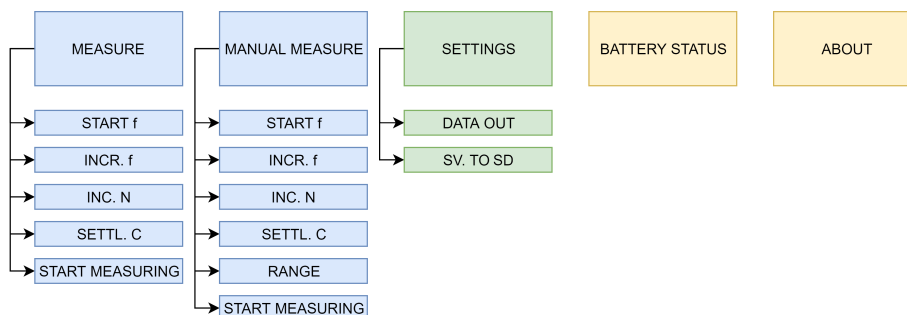
5.3 Softwarové řešení

Řídicí mikrokontrolér jsem programoval pomocí rozhraní SWD přes programátor ST-Link v2. Pomocí programu STM32CubeMX jsem určil pracovní kmitočty jádra a periférií. Dále jsem přiřadil piny perifériím, které obsluhují sběrnice. Ostatní GPIO piny jsem přepnul na vstupní nebo výstupní podle použití, například tlačítka, LED, enkodér. Dále jsem nadefinoval přerušování od tlačítek a enkodéru. V tomto programu jsem dále nadefinoval příslušnou rychlost sběrnice I²C a SPI. Nakonec jsem nechal vygenerovat kód pro vývojové prostředí Atollic TrueSTUDIO, ve kterém jsem psal celý program. Využíval jsem knihovny HAL, pomocí kterých jsem obsluhoval primárně interní periférie. Pro obsluhu externích periférií jsem buď použil již napsanou knihovnu z internetu, nebo jsem ji psal sám. Například obsluhu impedančního převodníku a obvodu ukazatele stavu nabití akumulátoru jsem psal sám a obsluhu SD karty a displeje jsem použil již hotovou knihovnu. Celý program zastřešuje menu systém popsany níže. Část kódu, který obsluhuje měření je v příloze D.

Při programování jsem narazil na problém s nedostatkem paměti v mikrokontroléru. Pro obsluhu SD karty jsem použil knihovnu pro souborový systém FAT. Tato knihovna zabírala přibližně 75 % paměti celého MCU. Celý program s obsluhou i ostatních periférií tedy přesahoval 32 kB paměti MCU. Zvolil jsem tedy jiný mikrokontroler jak uvádím v návrhu řešení (4.2.1).

5.3.1 Menu systém

Program obsahuje komplexní menu systém, který je tvořen pomocí struktur, které jsou navzájem provázané a tvoří tak síť položek, ve kterých se dá snadno pohybovat. Diagram menu systému je na obrázku č. 5.6. Po spuštění zařízení se spustí hlavní menu, které je v diagramu znázorněno velkými obdélníky. Vždy po potvrzení některé z možností v nastavení, nebo v položkách měření, dojde k uložení stavu do paměti EEPROM. Po opětovném zapnutí přístroje se veškeré nastavení nachází ve stavu v jakém bylo zanecháno.



Obrázek 5.6: Menu systém

- **MEASURE** - Po vybrání této možnosti se uživateli zobrazí podmenu, ve kterém se dají nastavit parametry měření. Je zde možné nastavit počáteční frekvenci, od které začne měření (START f.). Dále frekvenční krok (INCR. f), počet měření (INC. N) a počet cyklů sinusového signálu, než dojde k odměření dat (SETTL.C).
- **MANUAL MEASURE** - V tomto podmenu se dá nastavit to samé co v položce "MEASURE" a jeden z pěti impedančních rozsahů (RANGE).
- **SETTINGS** - Po zvolení této položky je zobrazeno menu nastavení zařízení, kde je možné zvolit jak se mají data zobrazovat a ukládat na SD kartu (DATA OUT). Dále se zde dá nastavit jestli se data mají na SD kartu ukládat nebo ne (SV. TO SD).
- **BATTERY STATUS** - V této položce se nachází typ akumulátoru a jeho aktuální stav, jako je napětí článku a zbývající kapacita v procentech.
- **ABOUT** - V této položce se nachází jaká verze firmwaru je nahrána v zařízení.

Kapitola 6

Oživení, testování, měření

V této kapitole je nejdříve okrajově zmíněno ožívování a základní testování funkčnosti zařízení. Dále je zde měření parametrů zařízení.

6.1 Oživení a sestavení zařízení

Plošné spoje jsem vždy osazoval postupně tak, aby bylo možné jednotlivé bloky otestovat. Vždy jsem začal s napájecí částí a až po otestování jsem osazoval mikrokontrolér a jeho nezbytné části. Po odzkoušení, zda jsem schopen mikrokontrolér programovat, jsem pokračoval s osazováním periférií a jejich testováním. Nakonec jsem osazoval část analogovou. Po osazení každé části jsem vždy plošný spoj omyl od smáčedla v alkoholu a následně umyl pod proudem vody a vysušil.

Následně jsem přidělal oba plošné spoje do příslušné části krytu a spojil je flex kabelem. Nainstaloval akumulátor a připojil jej do plošného spoje. Nakonec jsem spojil obě části krytu. Foto sestaveného zařízení včetně sondy je na obrázku č. 6.1.



Obrázek 6.1: Foto sestaveného zařízení včetně sondy

6.2 Testování funkčnosti analogové části

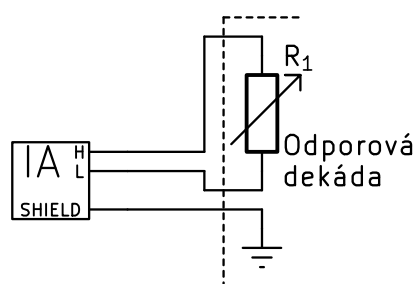
Testování analogové části jsem prováděl pro různé zpětnovazební rezistory v převodníku proudu na napětí, kde jsem vždy měřil průběhy napětí pomocí osciloskopu. Zjistil jsem, že převodník je nestabilní. Nestabilita nastávala v případě, kdy se jako měřená impedance připojil kondenzátor, který způsoboval, že operační zesilovač v převodníku proud na napětí nestíhal kompenzovat rychlé změny procházejícího proudu měřeným kondenzátorem. Doba přeběhu (Slew Rate) je u tohoto operačního zesilovače jen 5 V/ μ s. Po zjištění tohoto problému jsem provedl simulaci pomocí programu LTSpice, který obsahuje model tohoto operačního zesilovače. Volba zesilovače s rychlejší dobou přeběhu jen změnila kmitočet, na které operační zesilovač kmital. Dále jsem vyzkoušel doporučená zapojení v katalogovém listu pro kompenzaci operačního zesilovače pokud je připojena kapacitní zátěž, což nemělo žádný efekt. Dále jsem zjistil, že pro určité hodnoty zpětnovazebního rezistoru se nestabilita neprojevuje. Použil jsem tedy takové hodnoty, kde je převodník stabilní.

6.3 Měření jednotlivých rozsahů zařízení

V této sekci je popsáno měření vlastností měřicího přístroje. Z výsledných dat byla vytvořena tabulka a graf rozsahů přístroje a jejich relativní chyby.

6.3.1 Postup měření

Impedanční analyzátor jsem připojil k odporové dekádě Präzisions Kurbelwiderstand Typ 3 vyrobenou firmou VEB Messtechnik Mellenbach podle schématu na obrázku č. 6.2. Do impedančního analyzátoru jsem připravil testovací program, který mi dovolil ručně nastavit impedanční rozsah, provést měření v celém kmitočtovém rozsahu a vyexportovat data na SD kartu. Pro každý interní rozsah přístroje jsem měřil různé hodnoty odporu, dokud nedošlo k přetečení dat v registrech AD5933. Výsledná data jsem následně zpracoval pomocí programu Matlab. Jednu hodnotu, přibližně uprostřed rozsahu, jsem zvolil jako kalibrační, podle které jsem daný rozsah přístroje zkalibroval. Odporovou dekádu jsem považoval za ideální, její chyba na použitých rozsazích je 0,01 %. Z ostatních hodnot jsem vyjádřil relativní chybu měření vztaženou ke kalibrované hodnotě. Z výsledných dat jsem vytvořil tabulku rozsahů, ve kterých impedanční analyzátor měří s relativní chybou menší, než 1 %. Dále jsem z naměřených dat zjistil nejvhodnější kalibrační rezistory, které jsem následně osadil do zařízení.



Obrázek 6.2: Schéma zapojení měření impedančního analyzátoru

6.3.2 Použité vzorce

Impedanční převodník AD5933 obsahuje 2 registry, do kterých po každém měření ukládá reálnou $Re(\hat{I})$ a imaginární složku $Im(\hat{I})$ proudu, který prochází neznámou impedancí. Použité vzorce vyházejí z katalogového listu [8].

Nejdříve jsem vyjádřil převrácenou absolutní hodnotu proudu (6.1) všech hodnot měření. Dále, po zvolení vhodné hodnoty kalibračního odporu, jsem vyjádřil kalibrační data pro tento rezistor (6.2) (6.4). Pro ostatní hodnoty jsem vyjádřil výslednou absolutní hodnotu impedance (6.3) a fáze (6.5). Z těchto hodnot jsem následně vyjádřil absolutní hodnotu relativní chyby impedance $|\delta_{|\hat{Z}|}|$ a absolutní hodnotu absolutní chyby fáze $|\Delta_{\varphi}|$.

Převrácená absolutní hodnota proudu:

$$Mag = \frac{1}{\sqrt{Re(\hat{I}_{cal})^2 + Im(\hat{I}_{cal})^2}} \quad [1/A] \quad (6.1)$$

Kde \hat{I}_{cal} je proud procházející kalibračním rezistorem.

Kalibrace absolutní hodnoty impedance:

$$Gain = \frac{Mag}{R_{ref}} \quad [1/V] \quad (6.2)$$

Kde R_{ref} je hodnota kalibračního rezistoru.

Výsledná měřená absolutní hodnota neznámé impedance:

$$|\hat{Z}| = \frac{1}{\sqrt{Re(\hat{I})^2 + Im(\hat{I})^2} \cdot Gain} \quad [\Omega] \quad (6.3)$$

Kalibrace fáze (pro první a čtvrtý kvadrant):

$$\varphi_{cal} = \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{Im}(\hat{I}_{cal})}{\operatorname{Re}(\hat{I}_{cal})}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad [^\circ] \quad (6.4)$$

Výsledná měřená hodnota fáze neznámé impedance (pro první a čtvrtý kvadrant):

$$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{Im}(\hat{I})}{\operatorname{Re}(\hat{I})}\right) \cdot \frac{180}{\pi} - \varphi_{cal} \quad [^\circ] \quad (6.5)$$

Absolutní hodnota relativní chyby impedance:

$$|\delta_{|\hat{Z}|}| = \left| \frac{|\hat{Z}| - R_1}{R_1} \cdot 100 \right| \quad [\%] \quad (6.6)$$

Kde R_1 je hodnota nastavená na odporové dekádě.

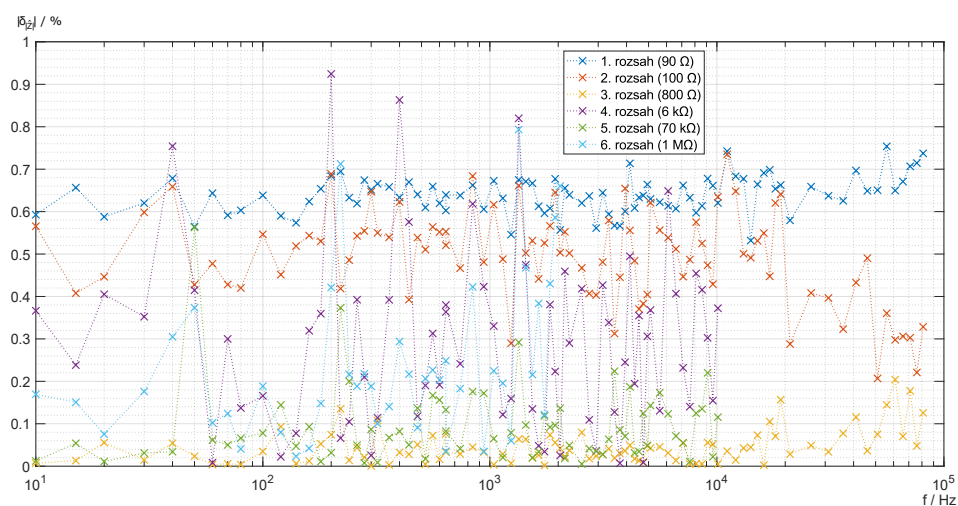
Absolutní hodnota absolutní chyby fáze:

$$|\Delta_\varphi| = \varphi \quad [^\circ] \quad (6.7)$$

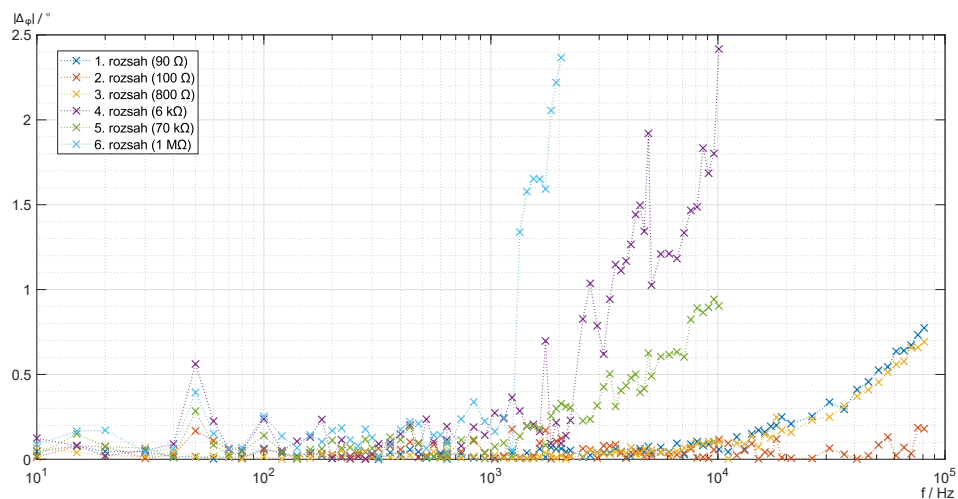
■ 6.3.3 Tabulky a grafy

Z naměřených dat jsem stanovil rozsahy zařízení, na kterých je relativní chyba menší než $\pm 1\%$. Výsledných 6 impedančních rozsahů je v tabulce č. 6.1. Pro každý rozsah jsem vybral data s největší chybou a zobrazil je v grafu závislosti absolutní hodnoty relativní chyby impedance $|\delta_{|\hat{Z}|}|$ na kmitočtu f . Graf je na obrázku č. 6.3. Jsou zde zobrazeny jen hodnoty do takového kmitočtu, než se začala chyba prudce zvětšovat. Z grafu tedy lze vytvořit frekvenční rozsah pro každý rozsah impedanční. Jednotlivé rozsahy jsou uvedeny v tabulce č. 6.1.

Dále jsem analogicky vybral data pro každý rozsah, kde je největší chyba fáze. Graf závislosti absolutní chyby fáze $|\Delta_\varphi|$ na kmitočtu f je na obrázku č. 6.4. Z grafu jsem vytvořil tabulku 6.2, ve které je uvedena chyba měření fáze pro jednotlivé rozsahy.



Obrázek 6.3: Závislost absolutní hodnoty relativní chyby na frekvenci pro nejhorší hodnoty z každého rozsahu



Obrázek 6.4: Závislost absolutní hodnoty relativní chyby na frekvenci pro nejhorší hodnoty z každého rozsahu

Tabulka 6.1: Impedanční rozsahy

| Označení rozsahu | Impedanční rozsah | Frekvenční rozsah |
|------------------|--|-------------------|
| 1. | $40 \Omega - 90 \Omega$ | 10 Hz – 80 kHz |
| 2. | $90 \Omega - 800 \Omega$ | 10 Hz – 80 kHz |
| 3. | $200 \Omega - 1 \text{ k}\Omega$ | 10 Hz – 80 kHz |
| 4. | $1 \text{ k}\Omega - 6 \text{ k}\Omega$ | 10 Hz – 10 kHz |
| 5. | $6 \text{ k}\Omega - 70 \text{ k}\Omega$ | 10 Hz – 10 kHz |
| 6. | $70 \text{ k}\Omega - 1 \text{ M}\Omega$ | 10 Hz – 2 kHz |

Tabulka 6.2: Chyba měření fáze

| Absolutní hodnota impedance | Frekvenční rozsah | Chyba měření fáze |
|------------------------------|-------------------|-------------------|
| 40 Ω – 1 M Ω | 10 Hz – 1 kHz | $\pm 1^\circ$ |
| 40 Ω – 1 k Ω | 1 kHz – 80 kHz | $\pm 1^\circ$ |
| 1 k Ω – 70 k Ω | 1 kHz – 10 kHz | $\pm 2,5^\circ$ |
| 70 k Ω – 1 M Ω | 1 kHz – 2 kHz | $\pm 2,5^\circ$ |

6.3.4 Shrnutí výsledků

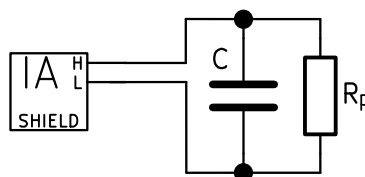
Z měření byly zvoleny nejvhodnější kalibrační rezistory pro každý impedanceční rozsah. Dále byly stanoveny frekvenční rozsahy a chyby měření.

6.4 Měření kondenzátorů

V této sekci je popsáno měření kapacity a ztrátového činitele kondenzátorů.

6.4.1 Postup měření

Nejdříve jsem zvolil tři různé hodnoty kapacity na kapacitní dekádě, u kterých jsem změřil kapacitu C a ztrátový činitel $tg\delta$ pomocí RLCG metru Tesla BM 595. Měření probíhalo na kmitočtu 1 kHz. Naměřená data jsou v tabulce 6.3. Dále jsem pro každou hodnotu kapacity zvolil 2 různé rezistory R_p , které jsem následně postupně připojoval paralelně k danému kondenzátoru a tím simuloval větší ztrátový činitel $tg\delta$. Poté jsem tyto kombinace postupně změřil na impedancečním analyzátoru na stejném kmitočtu (1 kHz). Schéma zapojení měření je na obrázku č. 6.5. Dále jsem vytvořil tabulku č. 6.4, ve které jsou spočtená a naměřená data.

**Obrázek 6.5:** Schéma zapojení měření kondenzátorů

6.4.2 Použité vzorce

Teoretická (očekávaná) hodnota ztrátového činitele:

$$tg\delta_T = \frac{1}{\omega \cdot C_{RLCG} \cdot R_p} + tg\delta_{RLCG} \quad [-] \quad (6.8)$$

Kde C_{RLCG} je kapacita změřená RLCG metrem, $tg\delta_{RLCG}$ je ztrátový činitel změřený RLCG metrem a R_p je odpor připojovaný paralelně ke kapacitě C .

Změřená hodnota kapacity:

$$C_M = \frac{1}{\omega * Im(\hat{Z}_M)} = \frac{1}{\omega * |\hat{Z}_M| * sin(\varphi_M)} \quad [F] \quad (6.9)$$

Kde $|\hat{Z}_M|$ je absolutní hodnota impedance změřená impedančním analyzáto-rem a φ_M je fáze změřená impedančním analyzáto-rem.

Změřená hodnota ztrátového činitele:

$$tg\delta_M = \frac{R}{X_C} = \frac{Re(\hat{Z}_M)}{Im(\hat{Z}_M)} = \frac{cos(\varphi_M)}{sin(\varphi_M)} \quad [-] \quad (6.10)$$

Kde R je reálná složka impedance, X_C je reaktance kondenzátoru.

6.4.3 Tabulky

Tabulka 6.3: Naměřená data pomocí RLCG metru Tesla BM 595

| Nastavená hodnota | Změřená data pomocí RLCG | |
|-------------------|--------------------------|-----------------------|
| C / nF | C_{RLCG} / nF | $tg\delta_{RLCG}$ / - |
| 1 | 1,041 | 0,0008 |
| 5 | 5,052 | 0,0007 |
| 10 | 10,11 | 0,0007 |

Kde C je kapacita nastavená na kapacitní dekádě, C_{RLCG} je kapacita změřená RLCG metrem a $tg\delta_{RLCG}$ je ztrátový činitel změřený RLCG metrem.

Tabulka 6.4: Výsledky měření

| Měřená kombinace | | Teoretická hodnota | Zaměřená data | | Vypočtená data | |
|------------------|----------------|--------------------|------------------------|----------------------|-------------------|------------------|
| C / nF | R_p / Ω | $tg\delta_T / -$ | $ \hat{Z}_M / \Omega$ | $\varphi_M / ^\circ$ | C_M / nF | $tg\delta_M / -$ |
| 1 | - | 0,0008 | 117737 | 86,8 | 1,302 | 0,056 |
| 1 | 1301000 | 0,1183 | 117196 | 81,5 | 1,320 | 0,150 |
| 1 | 301000 | 0,5087 | 109425 | 65,5 | 1,536 | 0,454 |
| 5 | - | 0,0007 | 28018 | 89,2 | 5,462 | 0,013 |
| 5 | 310000 | 0,1023 | 28001 | 83,9 | 5,496 | 0,106 |
| 5 | 110000 | 0,2871 | 27259 | 75,2 | 5,807 | 0,264 |
| 10 | - | 0,0007 | 14572 | 89,3 | 10,50 | 0,013 |
| 10 | 150000 | 0,1057 | 14512 | 83,8 | 10,61 | 0,109 |
| 10 | 51000 | 0,3095 | 14020 | 73,3 | 11,39 | 0,299 |

Kde C a R_p je měřená paralelní kombinace, $tg\delta_T$ je teoretická hodnota ztrátového činitele, která zahrnuje původní změřenou hodnotu pomocí RLCG metru a hodnotu vypočtenou z paralelní kombinace C a R_p , C_M je výsledná změřená hodnota kapacity pomocí impedančního analyzátoru a $tg\delta_M$ je výsledná změřená hodnota ztrátového činitele.

6.4.4 Shrnutí výsledků

Z naměřených dat je vidět, že impedanční analyzátor je vhodný pro provozní měření kondenzátorů. Největší chybu zde zanáší chyba měření fáze, hlavně u velmi malých hodnot ztrátového činitele $tg\delta$.

Kapitola 7

Závěr

Cílem této práce bylo realizovat mobilní impedanční analyzátor pro provozní měření impedance. Nejdříve jsem se seznámil s metodami měření impedance a dále pokračoval s návrhem zařízení. Analyzátor umožňuje připojení měřené součástky pomocí sondy. Naměřená data lze zobrazit jako reálná a imaginární složka impedance, nebo v polárních souřadnicích, tedy absolutní hodnota impedance a fáze. Data se zobrazují na OLED displeji a je možné je uložit na micro SD kartu. Tlačítka a rotační enkodér umožňují snadné ovládání zařízení. V přístroji je jednoduché uživatelské rozhraní, které umožňuje automatickou či manuální volbu impedančních rozsahů. Impedanční a k nim korespondující frekvenční rozsahy jsou uvedeny v tabulce č. 7.1.

Tabulka 7.1: Impedanční rozsahy měření

| Absolutní hodnota impedance | Frekvenční rozsah |
|------------------------------|-------------------|
| 40 Ω – 1 k Ω | 10 Hz – 80 kHz |
| 1 k Ω – 70 k Ω | 10 Hz – 10 kHz |
| 70 k Ω – 1 M Ω | 10 Hz – 2 kHz |

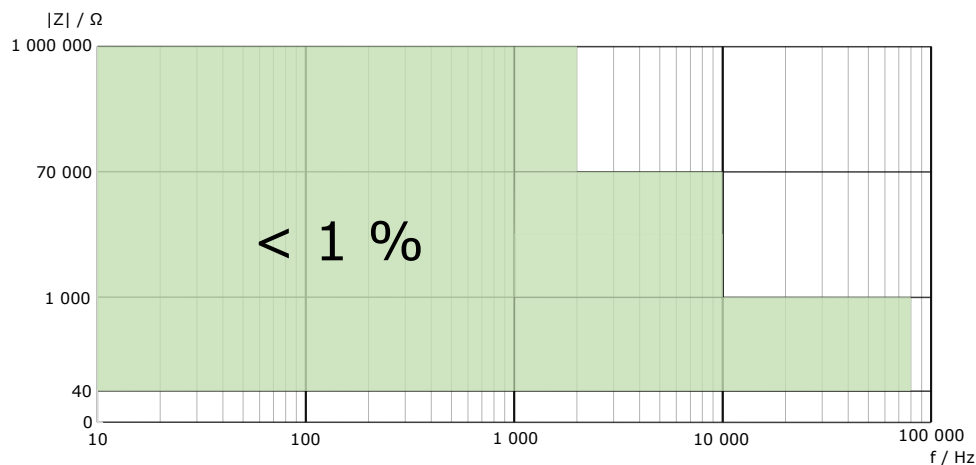
Výsledné zařízení měří na daných rozsazích absolutní hodnotu impedance s relativní chybou menší než 1 % a fázový posuv s absolutní chybou menší než 1 ° pro některé rozsahy a pro vyšší kmitočty a vyšší impedance je chyba menší než 2,5 °. Celé rozsahy a chyby měření jsou v grafech na obrázcích č. 7.1 a 7.2.

Zařízení obsahuje dva plošné spoje, které jsou propojené flex kabelem. V průběhu práce vznikly dvě verze hlavního plošného spoje. První verze sloužila pro testování analogové vstupní části, se kterou jsem řešil několik problémů, které jsem do druhé verze vyřešil. Dále jsem v druhé verzi odstranil řadu chyb, kterých jsem se v návrhu první verze dopustil.

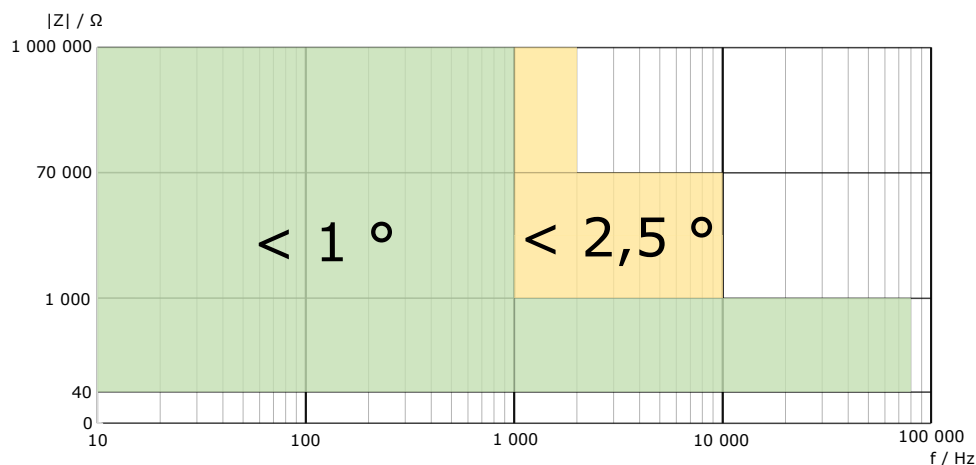
Kryt zařízení byl vytištěn na 3D tiskárně ze dvou barev tak, aby byli ovládací prvky dobře čitelné. Dále byl kryt navržen tak, aby případný servis byl snadný. Použití dvou plošných spojů umožnilo, aby se zařízení vešlo do jedné ruky. Celé zařízení má rozměry (Š × H × V) 87 mm × 131 mm × 48 mm.

Kdybych na práci pokračoval dále, upravil bych analogovou část zařízení tak, aby bylo možné použít více kalibračních rezistorů. Tímto bych docílil vyšší přesnosti měření. Dále bych zlepšil uživatelské rozhraní, které by šlo

zpřehlednit. Také bych umožnil čtení SD karty pomocí USB portu, který zatím slouží pouze pro nabíjení. Dále bych navrhl napájecí část tak, aby bylo možné provozovat zařízení i při nabíjení akumulátoru. V aktuálním stavu toto možné není. V další verzi bych vyměnil akumulátor typu 18650 za plochý a tím zúžil celé zařízení.



Obrázek 7.1: Rozsahy měření absolutní hodnoty impedance, kde má zařízení relativní chybu měření menší než 1 %



Obrázek 7.2: Absolutní chyba měření fáze na příslušných impedančních rozsazích



Literatura

- [1] Impedance Measurement Handbook [online]. USA: Keysight Technologies, 2016 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.keysight.com/zz/en/assets/7018-06840/application-notes/5950-3000.pdf>
- [2] ŠOTOLA, Vojtěch. Měření imitancí Imittance [online]. 2016 [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <http://www.sotovo.cz/str/elm.php?id=20>
- [3] Impedance. Wikipedia [online]. 5. 2. 2018 [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Impedance>
- [4] BENEK, Jan. Metody měření indukčností. Plzeň, 2015. Bakalařská Práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Jindřich Jansa.
- [5] STM32L072CB. STMicroelectronics [online]. [cit. 2020-07-24]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32l072cb.html>
- [6] VAVŘIŇÁK, Petr. Základy elektroniky - řešení příkladů [online]. , 96-109 [cit. 2020-08-08]. Dostupné z: http://www.sse-najizdarne.cz/projekty/time/Download/TIME_SSE_ZE%20-%20Zaklady%20elektrotechniky%20-%20reseni%20prikladu.pdf
- [7] HAASZ, Vladimír a Miloš SEDLÁČEK. Elektrická měření: přístroje a metody [online]. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003 [cit. 2020-08-08]. ISBN 80-010-2731-7.
- [8] Datasheet AD5933: Analog Devices, Inc. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5933.pdf>
- [9] AN-843 Application Note AD5933: Analog Devices, Inc. Dostupné z: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/236037846AN_843.pdf
- [10] CN0217 Application Note AD5933: Analog Devices, Inc. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/reference-design-documentation/reference-designs/CN0217.pdf>

- [11] What is an LCR Meter ?[online]. [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.ietlabs.com/lcr-meter-informational-guide>
- [12] BEJČEK LUDVÍK, DOC. ING., CSC. Měření v elektrotechnice. Vysoké učení technické v Brně, 2007. Skripta.
- [13] Determining the Equivalent Series Resistance (ESR) of Capacitors[online]. [cit. 2020-08-07]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/determining-equivalent-series-resistance-esr-of-capacitors/>
- [14] Displej ssd1309. CHINAEXPRESS [online]. [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <http://www.chinaexpress.cz/cs/item/White-2-42-2-42-inch-LCD-Screen-12864-OLED-Display-Module-IIC-I2C-SPI-Serial/32971735767.html>

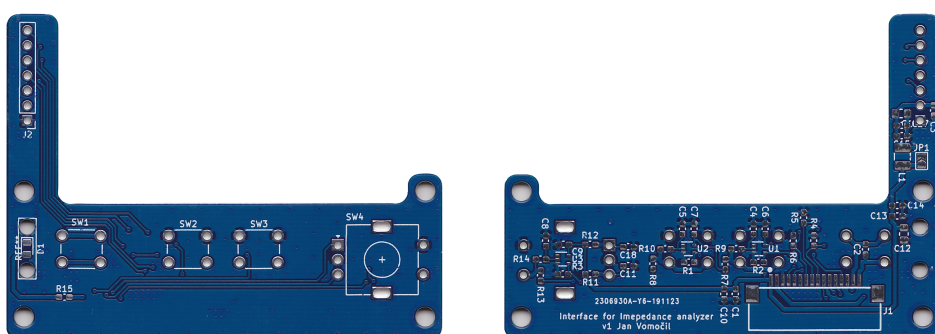
Příloha A

Seznam zkratek

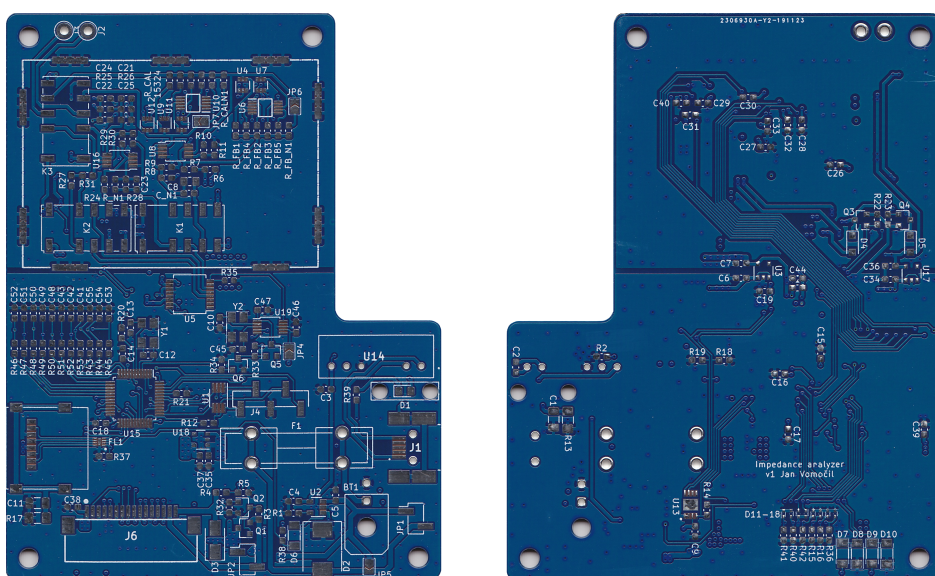
| Zkratka | Celý název |
|------------------|---|
| ABS | Akrylonitrilbutadienstyren |
| BNC | Bayonet Neill Concelman |
| CLK | Clock |
| CSV | Comma-separated values |
| DAC | Digital-to-analog converter |
| DC | Direct current |
| DMIPS | Dhrystone Million Instructions Per Second |
| DMM | Digital multimeter |
| EEPROM | Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory |
| ESR | Equivalent series resistance |
| FAT | File Allocation Table |
| GPIO | General-purpose input/output |
| HAL | Hardware Abstraction Layer |
| IO | Input Output |
| I ² C | Inter-Integrated Circuit |
| USB | Universal Serial Bus |
| LED | Light-Emitting Diode |
| MCU | Microcontroller unit |
| OLED | Organic light-emitting diode |
| PCB | Printed Circuit Board |
| RAM | Random Access Memory |
| SD | Secure Digital |
| SPI | Serial Peripheral Interface |
| SWD | Serial Wire Debug |

Příloha B

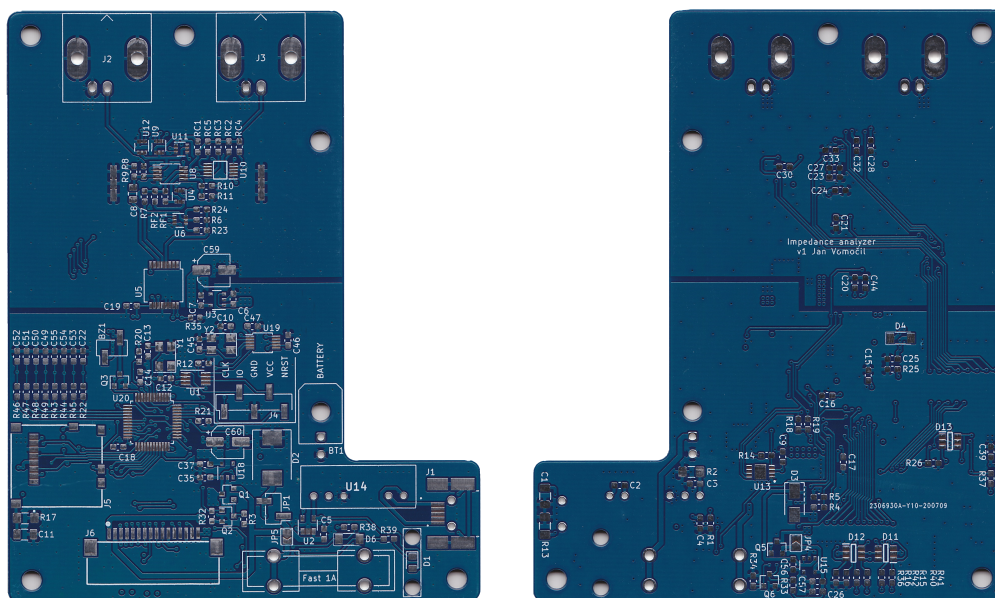
Obrázky



Obrázek B.1: Plošný spoj ovládacích prvků, přední (vlevo) a zadní (vpravo) strana



Obrázek B.2: 1. verze hlavního plošného spoje přední (vlevo) a zadní (vpravo) strany

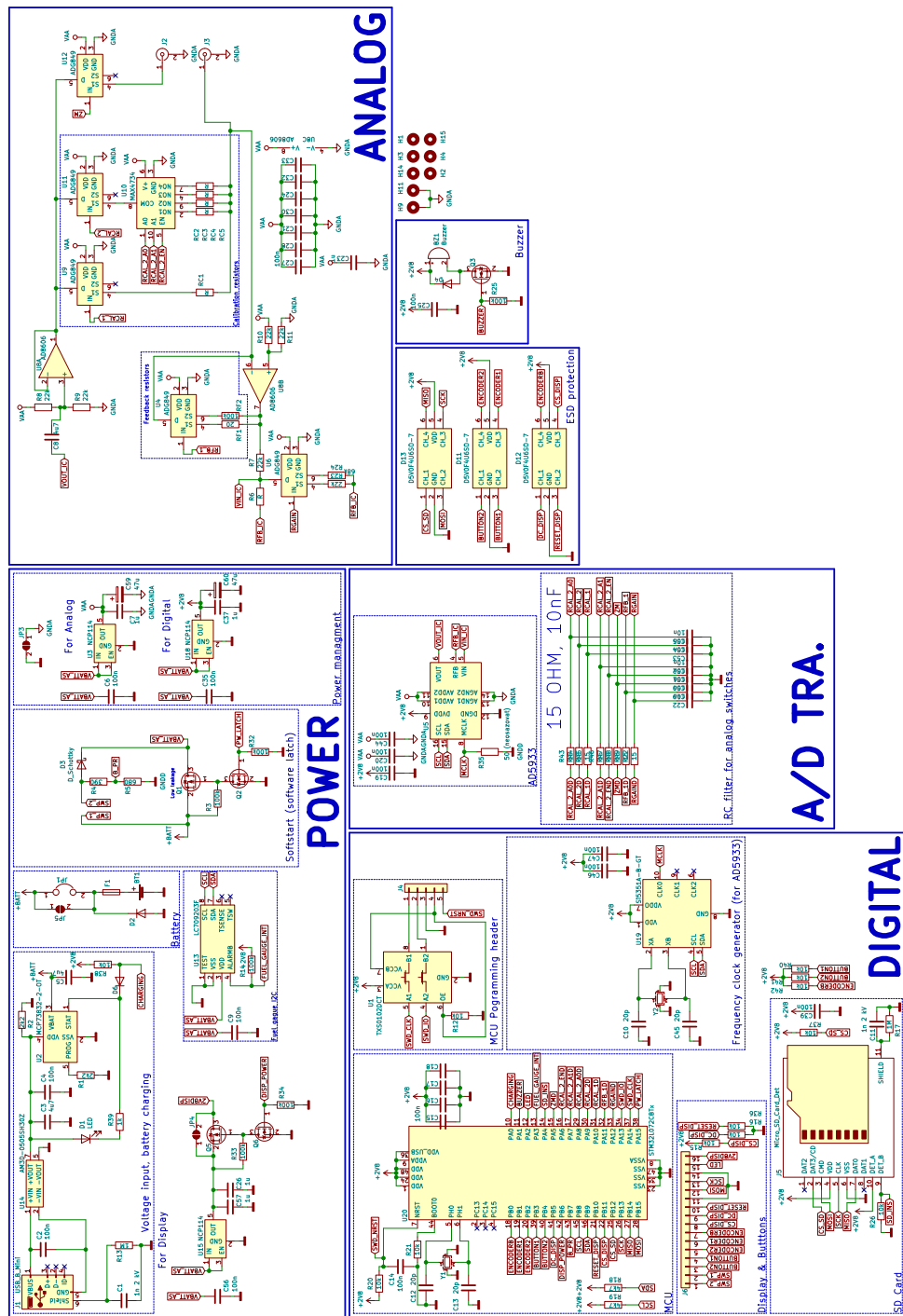


Obrázek B.3: 2. verze hlavního plošného spoje přední (vlevo) a zadní (vpravo) strany

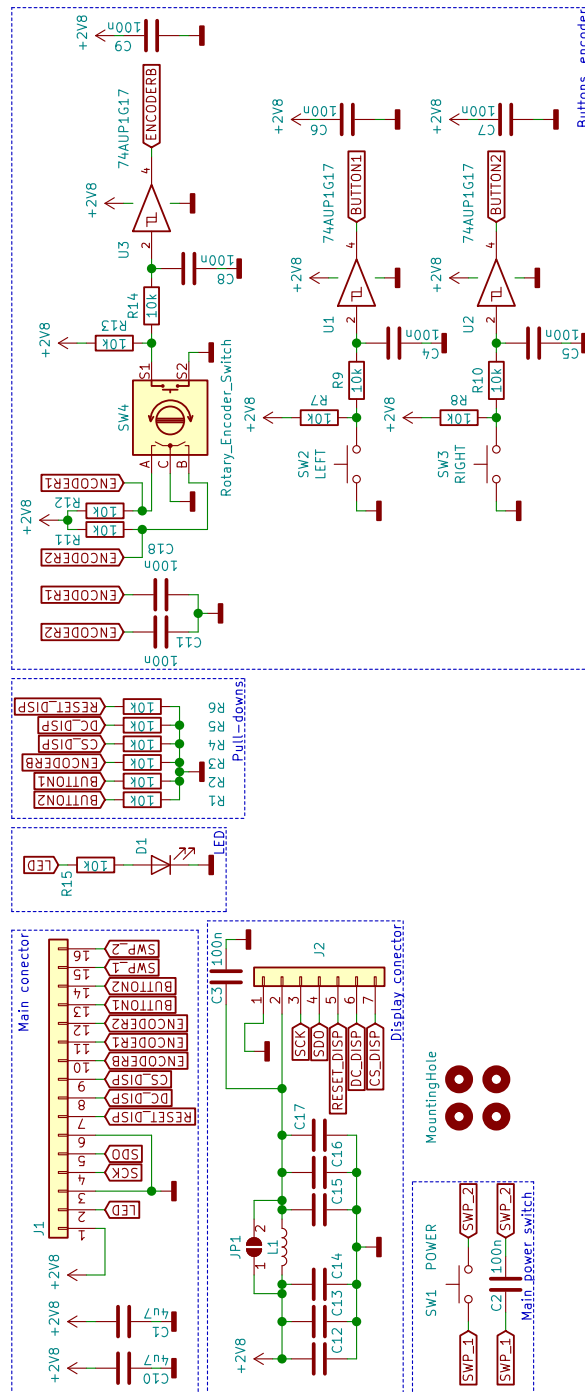


Příloha C

Schéma zapojení



Obrazek C.1: Celé schéma zapojení hlavního plošného spoje



Obrázek C.2: Celé schéma zapojení plošného spoje ovládacích prvků

Příloha D

Příklad kódu v jazyce C

Zde je uveden příklad kódu, který obsluhuje manuální režim měření.

```
int16_t *real = (int*) calloc((nofinc + 2), sizeof(int));
int16_t *imag = (int*) calloc((nofinc + 2), sizeof(int));
float *calGain = (float*) calloc((nofinc + 2), sizeof(float));
float *calPhase = (float*) calloc((nofinc + 2), sizeof(float));
float *Z = (float*) calloc((nofinc + 2), sizeof(float));
float *P = (float*) calloc((nofinc + 2), sizeof(float));
// alokace poli pro vytsupni data z AD5933 (real registr, imag
// registr, kalibrace modulu, kalibrace faze a docasne vystupni
// data)
// delka pole je pocet frekvencnich kroku nastavenych uzivatelem
for (int i = 0; i < nofinc + 2; i++) { // nulovani poli
    real[i] = 0;
    imag[i] = 0;
    calGain[i] = 0;
    calPhase[i] = 0;
}
int countData = 0; //pomocna promena
DisplayPower(0); // Odpojeni displeje od napajeni
TurnLed(1); // Rozsviceni LED
interupt = 0; // Zakazani preruseni
ClearMainArras(); // Nulovani poli, ktere jsou definovane jako
// globalni a slouzi pro ulozeni vystupnich dat
Meas_Divide_f_Ranges(startf, incf, nofinc, substartf, subnoinc);
// Tato metoda rozdeli kmitoctovy interval zadany uzivatelem na
// interni kmitoctove rozsahy
for (int i = 0; i < 12; i++) { // Pro kazdy kmitoctovy rozsah
    if (substartf[i] != 0) { // Zjisteni, zda je tento rozsah nutne
        // pouzit
        Meas_Set_f_ranges(substartf[i]); // Nastaveni aktualniho
        // kmitoctoveho rozsahu (nastaveni zdroje hodin Si5351)
        Meas_setAD5933(substartf[i], incf, subnoinc[i], sett11); //
        // Nastaveni impedancniho prevodniku (pripraveno na sweep)
        Meas_SetRange(actualRange); // Nastaveni impdancniho rozsahu
        // zvoleneho uzivatelem
        Meas_setRcal(actualRange); // Pripojeni prislusneho
        // kalibracniho rezistoru
        HAL_Delay(1);
    }
}
```

```

AD5933_fSweep(real, imag, subnoinc[i]); // Namereni
    kalibracnich dat
calcCal(real, imag, calGain, calPhase, subnoinc[i] + 1,
    actualRange); // Vypocet kalibracnich dat

Meas_setDUT(); // Pripojeni nezname impedance
AD5933_fSweep(real, imag, subnoinc[i]); // Mereni
calcOutput(real, imag, calGain, calPhase, subnoinc[i] +
    1,Z,P); // Vypocet vystupnich dat
for (int j = 0; j < (subnoinc[i] + 1); j++) { //
    V cyklu dojde k zapisu dat do vystupnich globalnich poli
    fout[countData] = (incf * j) + substartf[i];
    ZOut[countData] = Z[j];
    POut[countData] = P[j];
    countData++;
}
}
}

SaveToSD(); // Ulozeni dat na SD
DisplayPower(1); // Zapnuti displeje
TurnLed(0); // Zhasnuti LED
dataOut(); // Vypis dat

// -----
// Metody pro vypocet kalibracnich dat a vystupnich dat
calcCal(int16_t *real, int16_t *imag, float *calGain, float
    *calPhase,
    uint16_t nofinc, uint8_t actualRange) { // Metoda pro vypocet
    kalibracnich dat
uint32_t rcalValue = getValueOfRcal(actualRange);
for (int i = 0; i < nofinc; i++) {
    calGain[i] = (1 / (sqrt(pow((float) real[i], 2) + pow((float)
        imag[i], 2)))) / rcalValue; // Vypocet kalibracnich dat
    modulu impedance
    if ((real[i] >= 0 && imag[i] >= 0) || real[i] >= 0 && imag[i]
        < 0) { // Vypocet kalibracnich dat faze podle kvadrantu
        calPhase[i] = atan(((float) imag[i]) / (float) real[i]) *
            (180 / M_PI);
    }
    if (real[i] < 0 && imag[i] >= 0) {
        calPhase[i] = 180 + atan(((float) imag[i]) / (float)
            real[i]) * (180 / M_PI);
    }
    if (real[i] < 0 && imag[i] < 0) {
        calPhase[i] = atan(((float) imag[i]) / (float) real[i]) *
            (180 / M_PI) - 180;
    }
}
}
}

```

```
calcOutput(int16_t *real, int16_t *imag, float *calGain, float
*calPhase,
uint16_t nofinc, float *ZOut, float *POut) { // Metoda pro
vypocet vystupnich dat
for (int i = 0; i < nofinc; i++) {
ZOut[i] = (1 / (sqrt(pow((float) real[i], 2) + pow((float)
imag[i], 2)))) / calGain[i]; // Vypocet modulu impedance
if ((real[i] >= 0 && imag[i] >= 0) || real[i] >= 0 && imag[i]
< 0) { // Vypocet faze podle kvadrantu
POut[i] = atan(((float) imag[i]) / (float) real[i]) * (180 /
M_PI) - calPhase[i];
}
if (real[i] < 0 && imag[i] >= 0) {
POut[i] = 180
+ atan(((float) imag[i]) / (float) real[i]) * (180 /
M_PI) - calPhase[i];
}
if (real[i] < 0 && imag[i] < 0) {
POut[i] = atan(((float) imag[i]) / (float) real[i]) * (180 /
M_PI) - 180 - calPhase[i];
}
}
}
```

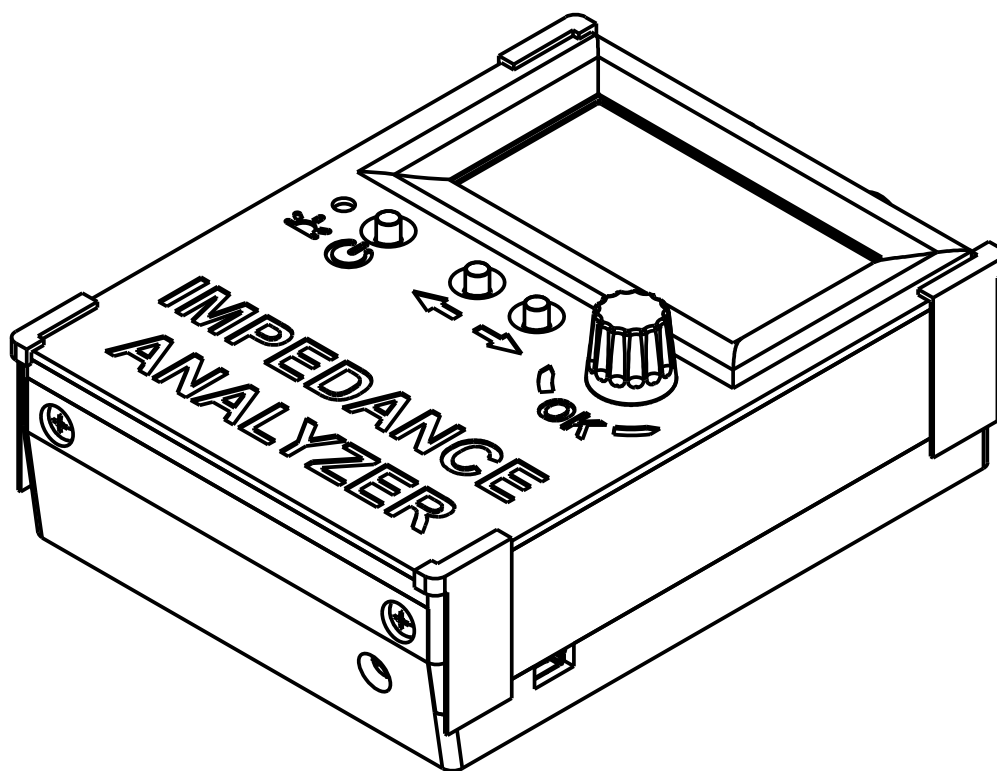


Příloha E

Návod k obsluze (Samostatná textová publikace)

Návod k obsluze

IMPEDANČNÍ ANALYZÁTOR



13. srpna 2020

1 Specifikace

Tabulka 1: Obecné specifikace

| | |
|---|--|
| Rozměry ($\check{S} \times H \times V$) | 87 mm \times 131 mm \times 48 mm |
| Typ akumulátoru | 18650 3,6 V s integrovanou ochranou elektronikou |
| Kapacita akumulátoru | 10 Wh (2800 mAh) |
| Výdrž akumulátoru | 8 h měření |
| Spotřeba zařízení | max 1,5 W |
| Spotřeba zařízení ve vypnutém stavu | < 340 nW |
| Doba nabíjení | 7 h |
| Maximální odebíraný proud z USB | 600 mA |
| Typ SD karty | micro SD, max 8 GB |
| Podporovaný souborový systém | FAT32 |

Tabulka 2: Rozsahy měření a přesnost

| Absolutní hodnota impedance | Frekvenční rozsah | Přesnost měření absolutní hodnoty impedance (z naměřené hodnoty) |
|------------------------------|-------------------|--|
| 40 Ω – 1 k Ω | 10 Hz – 80 kHz | $\pm 1 \%$ |
| 1 k Ω – 70 k Ω | 10 Hz – 10 kHz | $\pm 1 \%$ |
| 70 k Ω – 1 M Ω | 10 Hz – 2 kHz | $\pm 1 \%$ |

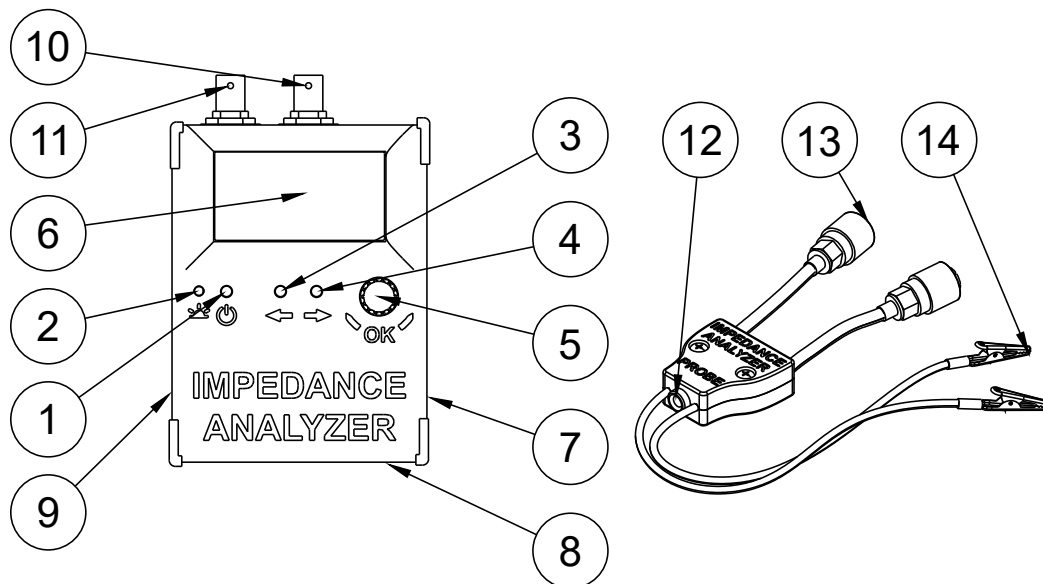
Tabulka 3: Přesnost měření fáze

| Absolutní hodnota impedance | Frekvenční rozsah | Přesnost měření fáze |
|------------------------------|-------------------|----------------------|
| 40 Ω – 1 M Ω | 10 Hz – 1 kHz | $\pm 1^\circ$ |
| 40 Ω – 1 k Ω | 1 kHz – 80 kHz | $\pm 1^\circ$ |
| 1 k Ω – 70 k Ω | 1 kHz – 10 kHz | $\pm 2,5^\circ$ |
| 70 k Ω – 1 M Ω | 1 kHz – 2 kHz | $\pm 2,5^\circ$ |

Tabulka 4: Impedanční rozsahy

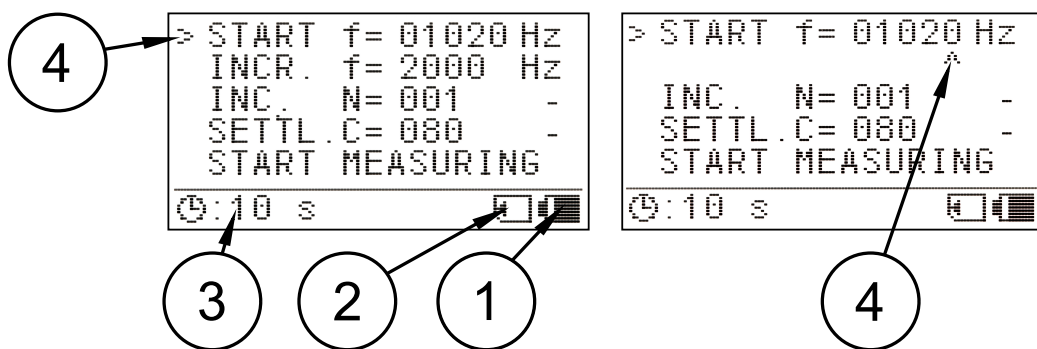
| Označení rozsahu | Impedanční rozsah |
|------------------|------------------------------|
| 1 | 40 Ω – 90 Ω |
| 2 | 90 Ω – 800 Ω |
| 3 | 200 Ω – 6 k Ω |
| 4 | 6 k Ω – 70 k Ω |
| 5 | 70 k Ω – 1 M Ω |

2 Ovládání



1. **Tlačítko zapínání** - Po stisknutí tlačítka se zařízení spustí. Po opětovném stisknutí se zařízení vypne.
2. **Indikační LED** - Slouží k indikaci, že právě probíhá měření. Po dobu měření LED svítí stále.
3. **Levé tlačítko** - Tlačítko slouží k posunutí v menu zpět. Tlačítkem se také posouvá o řád výše, pokud dochází k modifikaci číselných hodnot.
4. **Pravé tlačítko** - Tlačítko slouží k posunutí v menu dopředu. Tlačítkem se také posouvá o řád níže, pokud dochází k modifikaci číselných hodnot.
5. **Rotační enkodér** - Slouží k posouvání v jednotlivých položkách v menu nebo ke změně číselné hodnoty. Tlačítko enkodéru slouží k posunutí v menu dopředu. Pokud dochází k modifikaci číselných hodnot, slouží k potvrzení hodnoty.
6. **Displej** - Na displeji se zobrazují veškeré informace. Displej je při měření úplně vypnutý.
7. **USB port mini-B** - Slouží k nabíjení zařízení.
8. **LED nabíjení** - LED svítí, pokud se zařízení nabíjí. Dojde-li k nabití akumulátoru, LED zhasne.
9. **Slot na SD kartu** - Vkládejte pouze micro SD kartu o kapacitě max 8 GB formátovanou na souborový systém FAT32. Na kartu se ukládají naměřená data v textovém souboru CSV.

10. **Měřicí svorka L** - Označena modře. Používá konektor BNC.
11. **Měřicí svorka H** - Označena červeně. Používá konektor BNC.
12. **Sonda - Zdírka stínění** - Zdírka na banánek, která umožňuje snadné připojení stínění měřeného objektu ke stínění analyzátoru.
13. **Sonda - BNC konektory** - Konektory, pomocí kterých se sonda připojuje k impedančnímu analyzátoru.
14. **Sonda - krokosvorky** - Slouží k snadnému připojení měřené součástky.

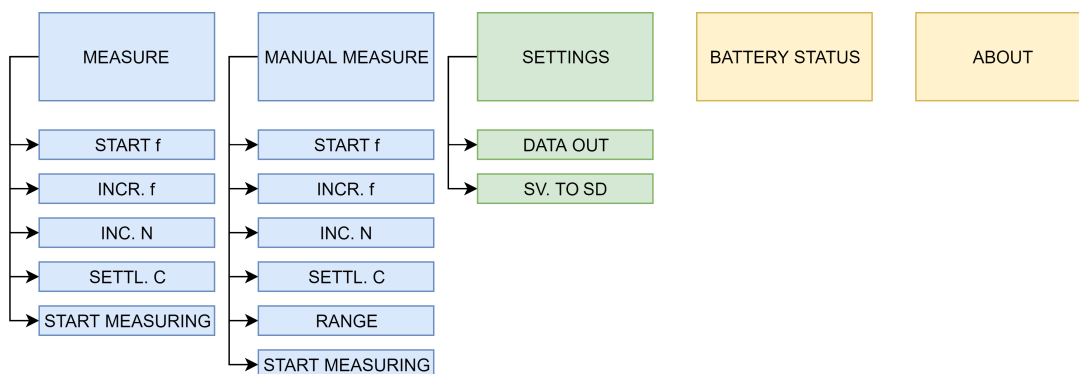


Obrázek 1: Hlavní menu

1. **Indikátor stavu akumulátoru** - Ikona akumulátoru zobrazuje aktuální stav akumulátoru. Pro přesnější informace klikněte na položku "BATTERY STATUS" v hlavním menu.
2. **Indikátor stavu SD karty** - Ikona zobrazuje, zda je vložena SD karta do zařízení. Pokud je v ikoně zobrazen křížek, není vložena SD karta.
3. **Předpokládaný čas trvání měření** - V položkách menu "MEASURE" a "MANUAL MEASURE" se zobrazí ikona hodin s časem, která zobrazuje čas, jak dlouho bude přibližně probíhat měření.
4. **Kurzor** - Kurzor ukazuje na aktuálně vybranou položku v menu či řád číselné hodnoty, který se aktuálně edituje.

3 Obecné informace

- Používejte pouze SD karty formátované na souborový systém FAT32. SD karta může mít maximální kapacitu 8 GB. Dále se ujistěte, že na SD kartě je dostatek volného místa.
- Po vložení SD karty se zařízení vypne. Je nutné jej znovu spustit. SD kartu je možné po měření vysunout i za běhu zařízení.
- Po připojení napájení pomocí USB konektoru se zařízení vypne. Znovu jej nezapínejte. LED nabíjení svítí po dobu nabíjení a zhasne, jakmile bude zařízení nabito. Poté lze USB kabel vysunout a zapnout zařízení.
- Po stisknutí zapínacího tlačítka dojde ke spuštění zařízení a zobrazí se hlavní menu. Diagram menu systému je na obrázku č. 2, kde položky hlavního menu jsou vyobrazeny velkými obdélníky a jednotlivá podmenu jsou vyobrazena obdélníky malými.
- Mezi položky aktuálního menu se lze pohybovat pomocí rotačního enkodéru (5). Potvrzení položky lze učinit stisknutím pravého tlačítka (4), nebo rotačního enkodéru (5). Posunout se zpět z podmenu lze stisknutím levého tlačítka (3).
- Editace číselných hodnot se provádí pomocí stisknutí pravého tlačítka (4) či rotačního enkodéru (5) na příslušné pozici. Hodnota číselné hodnoty se dá editovat pomocí rotačního enkodéru (5) a posouvání mezi řády číselné hodnoty je možné pomocí levého a pravého tlačítka (3) (4). Stisknutím rotačního enkodéru (5) dojde k uložení aktuální hodnoty a vrácení do předchozího menu.
- Při měření se rozsvítí Indikační LED na předním panelu a zhasne displej. Po odměření, se displej zase zapne a LED zhasne.
- Po každém odměření, kdy je zapnuto ukládání na SD kartu, se vytvoří nový soubor s unikátním číslem.



Obrázek 2: Menu systém

4 Popis jednotlivých položek v menu

- **MEASURE** - Po vybrání této možnosti se zobrazí podmenu, ve kterém se dají nastavit parametry měření. Impedanční rozsah se zvolí automaticky. Po nastavení parametrů lze spustit měření položkou "START MEASURING". Jednotlivé položky jsou dále vysvětleny v tabulce č. 5.
- **MANUAL MEASURE** - V tomto podmenu se dá nastavit to samé co v položce "MEASURE" a jeden z pěti impedančních rozsahů (RANGE) uvedených v tabulce č. 4. Po nastavení všech parametrů lze spustit měření položkou "START MEASURING".
- **SETTINGS** - Po zvolení této položky je zobrazeno menu nastavení zařízení, kde je možné zvolit jak se mají data zobrazovat a ukládat na SD kartu (DATA OUT). Dále se zde dá nastavit zda se data mají ukládat na SD kartu (SV. TO SD). Jednotlivé položky jsou dále vysvětleny v tabulce č. 5.
- **BATTERY STATUS** - V této položce se nachází typ akumulátoru a jeho aktuální stav, jako je napětí článku a zbývající kapacita v procentech.
- **ABOUT** - V této položce se nachází jaká verze firmwaru je nahrána v zařízení.

Tabulka 5: Položky v menu a jejich rozsahy

| Položka v menu | Popis | Rozsah |
|----------------|--|----------------|
| START f. | Frekvence, od které se spustí měření | 10 Hz - 80 kHz |
| INCR. f | Frekvenční krok | 1 Hz - 9999 Hz |
| INC. N | Počet kroků měření | 1 - 511 |
| SETTL C. | Počet cyklů sinusového průběhu, než dojde k odměření dat | 10 - 255 |
| RANGE | Interní imepedanční rozsahy viz tabulka č. 4 | 1 - 5 |
| DATA OUT | 0 = data se budou zobrazovat jako reálná a imaginární složka impedance 1 = data se budou zobrazovat jako absolutní hodnota impedance a fáze | 0 - 1 |
| SV. TO SD | 0 = Data se nebudou ukládat na SD kartu. 1 = Data se budou ukládat na SD kartu po každém měření | 0 - 1 |

5 Příklad naměřených dat

Na obrázku č. 3 je příklad dat z měření uložených v souboru CSV. Na obrázku č. 4 je příklad dat z měření uložených v souboru CSV importovaného do tabulkového editoru.

```
"f/Hz", "abs(Z)/ohm", "phase/deg"  
10,99.8,1  
100,98.3,2  
500,99,-1
```

Obrázek 3: Příklad souboru CSV

| | A | B | C |
|---|------|------------|-----------|
| 1 | f/Hz | abs(Z)/ohm | phase/deg |
| 2 | 10 | 99.8 | 1 |
| 3 | 100 | 98.3 | 2 |
| 4 | 500 | 99 | -1 |

Obrázek 4: Příklad souboru CSV importovaného do tabulkového editoru