

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2012, Plzeň

Bc. Jan Vašků

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Návrh přenosného měřicího přístroje pro měření svodové
admitance**

**vedoucí práce: Doc. Ing. Ivan Konečný, CSc.
autor: Bc. Jan Vašků**

2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan VAŠKŮ**
Osobní číslo: **E09N0194P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika**
Název tématu: **Návrh přenosného měřicího přístroje pro měření svodové admitance**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**


Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Z dostupné odborné literatury analyticky popište princip měření měrné svodové admitance na neohrazeném elektrickém kolejovém úseku.
2. Pomocí kaskádních matic popište model měřicí sestavy a v programu Matlab proveďte simulaci, která prokáže jeho použitelnost. Předpokládá se měření na kmitočtu v řádu kHz.
3. Na základě provedených analýz a simulací navrhnete HW a SW měřicího přístroje pro měření měrné svodové admitance a proveďte jeho praktickou zkoušku.
Preferuje se procesorové řešení řídicí části a koncový stupeň jako zesilovač třídy D.
4. Zhodnoďte dosažené výsledky.


Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Ivan Konečný, CSc.**
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací
Konzultant diplomové práce: **Doc. Ing. Ivan Konečný, CSc.**
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací
Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Tato práce se zabývá hledáním vhodného principu měření svodové admitance kolejového vedení, který by maximálně využil potenciál moderních elektronických technologií a především číslicového zpracování dat. Zařízení, které má být na tomto principu navrženo, musí být schopno správně pracovat v nejrůznějších provozních podmínkách na současné železniční infrastruktuře.

V první části je rozebrán obecný popis kolejového vedení z pohledu přenosu střídavých signálů a jsou uvedeny příslušné teoretické principy tohoto popisu. Je zde rozebrán také vliv různého zatížení kolejového vedení na jeho vstupní elektrické parametry.

V druhé kapitole je na základě teoretických závěrů první části navržen měřicí princip a jeho elektronická realizace a jsou z různých hledisek definovány také vhodné měřicí signály.

Třetí kapitola obsahuje přesný popis konkrétní realizace funkčního vzorku, který byl v rámci této práce zkonstruován. Princip zařízení vychází z druhé kapitoly a zde je popsána jak konkrétní hardwarová konfigurace měřicí části, tak i softwarové řešení výpočetního jádra.

V poslední části jsou shrnuty výsledky praktického ověření návrhu funkčního vzorku.

Klíčová slova

kolejové vedení, traťový svršek, svodová admitance, měřicí metoda

Abstract

Design of portable instrument for leakage admittance measurement

The thesis searches a suitable way of measuring the leakage admittance of a track section which would maximally utilize the potential of modern electronic technologies and digital data processing. The instrument which is to be designed must be able to operate correctly in various working conditions on the current railway infrastructure.

First part deals with a general description of a track section concentrating on alternating signal transmission. It further lists the theoretical concepts of such a description. It elaborates on the influence of various loading of track section on its input electrical parameters.

In the second part, based on the theoretical conclusions of the first chapter, the measuring principle and its electronic implementation are proposed. Furthermore, suitable measuring signals are defined taking into consideration different perspectives.

Third chapter includes a precise description of the particular realization of a functioning prototype which has been designed for the purpose. The working principle of the equipment is based on second chapter which describes the particular hardware configuration of the measuring part and a software solution of signal processing core.

Finally, the results of testing in field are summarized.

Key words

track section, measure method, leakage admittance

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 9. 5. 2012

Bc. Jan Vašků

Poděkování

Rád bych poděkoval především vedoucímu práce Doc. Ing. Ivanu Konečnému, CSc a konzultantovi Ing. Jiřímu Konečnému za cenné rady a připomínky a především za odbornou pomoc při realizaci funkčního vzorku zařízení. Dále bych rád poděkoval svým rodičům, kteří mi poskytli materiální a především morální podporu.

Obsah

OBSAH	1
ÚVOD	2
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	3
1 KOLEJOVÉ VEDENÍ	4
1.1 OBEČNÁ TEORIE PŘENOSU STŘÍDAVÝCH SIGNÁLŮ HOMOGENNÍM VEDENÍM	4
1.2 PARAMETRY KOLEJOVÉHO VEDENÍ	6
1.3 ZÁVISLOST VELIKOSTI VSTUPNÍ IMPEDANCE NA VÝSTUPNÍ ZÁTĚŽI	9
2 MĚŘÍCÍ METODA	13
2.1 INDIKÁTOR STAVU KOLEJOVÉHO LOŽE ISB1	13
2.2 MĚŘENÍ OBEČNÉ IMPEDANCE POMOCÍ NEINVERTUJÍCÍHO ZAPOJENÍ S OZ	15
2.3 VOLBA MĚŘÍCÍHO SIGNÁLU	17
2.3.1 <i>Volba z hlediska podélného útlumu vedení</i>	17
2.3.2 <i>Řešení odolnosti vůči rušivým vlivům trakčního proudu</i>	21
3 NÁVRH A REALIZACE ZAŘÍZENÍ	26
3.1 NÁVRH MĚŘÍCÍHO ŘETĚZCE	26
3.2 BLOK NAPÁJENÍ	27
3.3 BLOK GENERÁTORU MĚŘÍCÍHO SIGNÁLU	27
3.4 MĚŘÍCÍ BLOK	29
3.5 ŘEŠENÍ VÝPOČETNÍHO JÁDRA V PROSTŘEDÍ MATLAB	29
3.5.1 <i>Měření modulu impedance</i>	31
3.5.2 <i>Měření argumentu impedance</i>	31
3.6 NÁVRH DPS A KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ ZAŘÍZENÍ	36
4 OVĚŘENÍ NÁVRHU ZAŘÍZENÍ	37
4.1 MĚŘENÍ OBEČNÉ IMPEDANČNÍ ZÁTĚŽE	37
4.2 MĚŘENÍ MODELU KOLEJOVÉHO VEDENÍ	39
4.3 MĚŘENÍ NA REÁLNÉM KOLEJOVÉM VEDENÍ	41
ZÁVĚR	45
POUŽITÁ LITERATURA	46
PŘÍLOHY	1
PŘÍLOHA A – ZDROJOVÉ KÓDY POUŽITÝCH PROGRAMOVACÍCH JAZYKŮ	1
PŘÍLOHA B – ELEKTRICKÁ SCHÉMATA A OBRÁZKY	8

Úvod

Pro detekci kolejového vozidla v zabezpečeném traťovém úseku lze použít jednu ze dvou základních technologií. Kolejové obvody, které se v největší míře rozšířily především v zemích bývalého východního bloku, nebo počítače náprav, jejichž vznik je spojen se zeměmi západní Evropy. I přes současný trend, kdy počítače náprav ve velkém množství aplikací nahrazují technologii kolejových obvodů, jsou a jistě i v budoucnu budou kolejové obvody nepostradatelným technickým řešením v zabezpečovací technice. Z podstaty jejich funkce je však nutné dbát na udržení dobré kvality traťového svršku nejen z pohledu mechanických, ale hlavně i elektrických parametrů. Tento fakt je jedním z důvodů, proč jsou v současnosti stále více nasazovány počítače náprav, neboť z logiky jejich funkce není naprosto nutné sledovat kvalitu železničního svršku právě z hlediska elektrických parametrů. Kolejové obvody však nabízí funkce, které nikdy počítače náprav nebudou schopny zajistit. Jde především o detekci lomu kolejnice a mnohé výhody, které přináší podstata kombinační funkce kolejových obvodů oproti sekvenčnímu charakteru funkce počítačů náprav.

Pro zajištění správné funkce kolejového obvodu, resp. zajištění dobré šuntové citlivosti, je třeba sledovat především velikost svodu kolejového vedení. Používaný přístroj Indikátor stavu kolejového lože ISB 1, jehož konstrukce je ze 70. let 20. století, je vzhledem k širokému nasazení moderních elektrických trakčních vozidel použitelný pouze na odstavených tratích s odpojenou výstrojí kolejových obvodů, což je pro potřeby provozních měření naprosto nepřijatelné.

Přínosem mé práce je navržení měřicí metody, jež je použitelná pro realizaci funkčního vzorku měřicího přístroje, který je postaven na bázi moderních technologií. Především je využito teorie číslicového zpracování signálu a všech výhod, které tento přístup k řešení problému přináší. Výsledkem práce je zařízení, které je navrženo pro spolehlivé měření svodové admitance kolejového vedení tratí v plném provozu, které jsou pojížděny jak starým typem odporově, či tyristorově řízených pohonných vozidel, tak i nejmodernějšími trakčními vozidly s asynchronními motory a frekvenčními měniči, které způsobují silné širokospektrální rušení v kolejovém vedení.

Seznam symbolů a zkratk

IEC	Mezinárodní elektrotechnická komise
OZ	operační zesilovač
SS	stejnoseměrný
STŘ	střídavý
VÚŽ	Výzkumný ústav železniční
FFT	Fast Fourier Transform – Rychlá Fourierova transformace
DPS	deska plošných spojů
AD	analogově digitální
EKÚ	elektrický kolejový úsek
KO	kolejový obvod

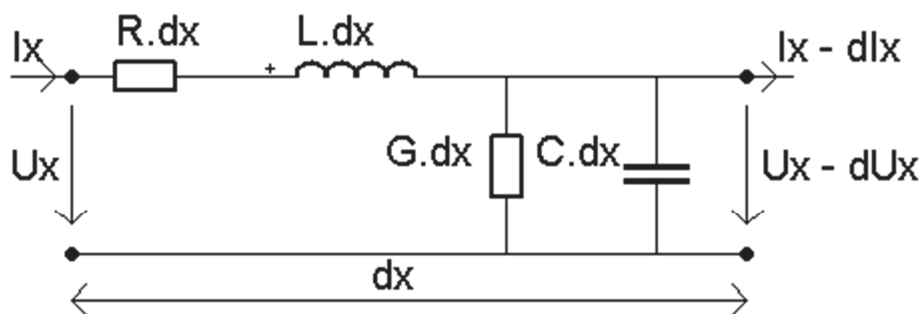
1 Kolejové vedení

Pro správný návrh zařízení, které je předmětem této práce, je samozřejmě nutné dobře pochopit principiální charakter kolejového vedení, které je měřeno. Bez ukotvení principu měření v příslušné teorii elektrického popisu železničního svršku není vůbec možné začít úkol řešit.

1.1 Obecná teorie přenosu střídavých signálů homogenním vedením

Jelikož se železniční svršek skládá ze dvou elektricky vodivých pasů (kolejnic) a jejich upevnění a uložení v železničním spodku (pražce, šterk), který je tvořen materiály především nevodivého charakteru a od kolejnic je odizolován izolačními podložkami, je možné kolejové vedení popsat pomocí obecné teorie přenosu střídavého signálu obecným vedením s rozprostřenými parametry.

Čtyřmi základními elektrickými parametry v elementu vedení jsou měrný podélný odpor R , měrná podélná indukčnost L , měrný příčný svod G a měrná příčná kapacita C . Tento element lze znázornit, jak je naznačeno na Obr. 1.1.



Obrázek 1.1 Element homogenního vedení

Je-li na vstup elementu přivedeno napětí U_x a proud I_x , budou na jeho výstupu sníženy tyto veličiny o hodnotu dU_x , resp. dI_x . Na základě této úvahy a znalosti struktury elementu vedení lze sepsat rovnice (1.1) a (1.2).

$$-dU_x = I_x(Rdx + j\omega Ldx) \quad (1.1)$$

$$-dI_x = U_x(Gdx + j\omega Cdx) \quad (1.2)$$

Derivací (1.1) a dosazením (1.2) do zderivovaného vztahu, získáme diferenciální rovnici druhého řádu (1.3). Opačným postupem získáme vztah v (1.4).

$$\frac{d^2 U_x}{dx^2} - \gamma^2 U_x = 0 \quad (1.3)$$

$$\frac{d^2 I_x}{dx^2} - \gamma^2 I_x = 0 \quad (1.4)$$

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (1.5)$$

Parametr γ , který je vyjádřen v (1.5), se nazývá konstanta šíření a je jedním z tzv. sekundárních parametrů vedení.

Řešení výše zmíněných diferenciálních rovnic druhého řádu je:

$$U_x = c_1 \cdot e^{\gamma x} + c_2 \cdot e^{-\gamma x} \quad (1.6)$$

$$I_x = c_3 \cdot e^{\gamma x} + c_4 \cdot e^{-\gamma x} \quad (1.7)$$

Konstanty c_3 a c_4 určíme dosazením do rovnice (1.1) a porovnáním koeficientů při stejných exponenciálních funkcích. Konstanty c_1 a c_2 vyčíslíme z okrajových podmínek. Uvažujeme, že je na počátku vedení ($x = 0$) napětí U_1 a proud I_1 . S použitím již známých konstant $c_{3,4}$ a dosazením do vztahů (1.6) a (1.7) získáváme již rovnice, které popisují průběh napětí a proudu na vedení ve vzdálenosti x od zdroje napájení (1.8) a (1.9).

$$U_x = \frac{1}{2}(U_1 - Z_0 I_1)e^{\gamma x} + \frac{1}{2}(U_1 + Z_0 I_1)e^{-\gamma x} \quad (1.8)$$

$$I_x = \frac{1}{2}\left(I_1 - \frac{U_1}{Z_0}\right)e^{\gamma x} + \frac{1}{2}\left(I_1 + \frac{U_1}{Z_0}\right)e^{-\gamma x} \quad (1.9)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (1.10)$$

Parametr Z_0 (1.10) se nazývá vlnová impedance vedení a je vedle konstanty šíření druhým sekundárním parametrem vedení. Využijeme – li hyperbolických funkcí $\sinh(\gamma x)$ a $\cosh(\gamma x)$ a zapíšeme – li oba vztahy (1.8) a (1.9) do společného maticového zápisu, získáme vztah (1.11).

$$\begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma x) & -Z_0 \sinh(\gamma x) \\ \frac{-\sinh(\gamma x)}{Z_0} & \cosh(\gamma x) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

Mnohem častěji se setkáváme s vyjádřením vstupních hodnot vedení v závislosti na výstupních. Tedy opačně než je tomu v (1.11). Místo obecné vzdálenosti x od počátku vedení se také častěji používá označení písmenem l . Konečně tedy získáváme vztah (1.12), který popisuje závislost vstupních parametrů vedení na výstupních pomocí tzv. kaskádní matice A , která je k matici v (1.11) inverzní.

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_0 \sinh(\gamma l) \\ \frac{\sinh(\gamma l)}{Z_0} & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

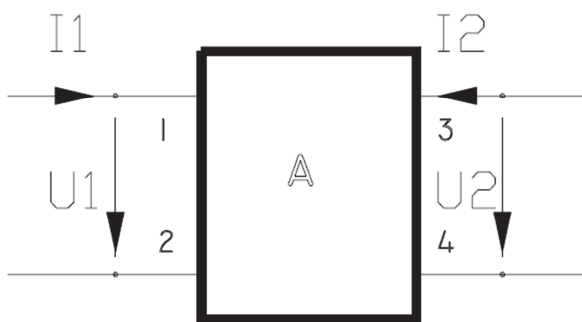
Při výpočtech s kolejovým vedením se ještě zavádí dva parametry. Měrná podélná impedance z (1.13) a měrná příčná admitance y (1.14). Sekundární parametry vedení jsou s jejich použitím definovány v (1.15).

$$z = R + j\omega L \quad (1.13)$$

$$y = G + j\omega C \quad (1.14)$$

$$\gamma = \sqrt{z \cdot y}, Z_0 = \sqrt{\frac{z}{y}} \quad (1.15)$$

„Na Obr. 1.2 je znázorněna orientace proudů tak, jak se od roku 1967 uvažuje podle IEC¹ běžně ve sdělovací technice po vedení. V kolejových obvodech je výstupní proud z dvojbranu vedení obvykle vstupním proudem pro dvojbran přijímacího konce, napětí mezi kolejnicemi se obvykle plynule snižuje, zátěž bývá (alespoň pro sledovaný kmitočet) pasivní. Z těchto praktických důvodů se teorie kolejových obvodů změně nepřizpůsobila a zůstala u orientace původní.“[1]



Obrázek 1.2 Běžné značení směrů proudů obecného modelu vedení ve sdělovací technice²

1.2 Parametry kolejového vedení

Teoretické závěry, které plynou z předchozí kapitoly, jsou však beze změny aplikovatelné pouze na systém dvou vodičů, které jsou nekonečně, resp. dostatečně daleko vzdáleny od povrchu země. Kolejové vedení se však ve skutečnosti skládá ze tří dílčích vedení, která se navzájem ovlivňují. Jedná se o vedení:

- první kolejnice – zem,

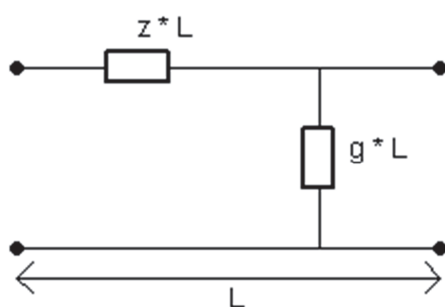
¹ International electrotechnical commission, Mezinárodní elektrotechnická komise

² Převzato z [1].

- druhá kolejnice – zem,
- první kolejnice – druhá kolejnice.

Z tohoto důvodu není možné konkrétní primární, či sekundární parametry měřit přímo. Pro úvahu nad výběrem měřicího principu pro navrhované zařízení je tedy nutné se opřít především o výsledky částečných měření na kolejovém vedení, která byla v minulosti provedena.

Pro účel této práce není nutné rozebírat konkrétní vztahy a principy, které s jistou mírou aproximace odpovídají reálnému kolejovému vedení. Pouze na základě jejich výsledků můžeme zobecnit měřené kolejové vedení dle Obr. 1.3.



Obrázek 1.3 Zobecněný model kolejového vedení

Parametr z se nazývá měrná podélná impedance kolejového vedení. Jsou jím respektovány především vlastnosti konkrétních kolejových pasů, které lze z elektrického pohledu charakterizovat činným odporem a vlastní indukčností, která je složena z indukčnosti vnitřní a vnější. Oba tyto parametry jsou značně závislé především na frekvenci přenášeného signálu. V případě indukčnosti je tato závislost samozřejmá, neboť tato veličina je přirozeně frekvenčně závislá. Je třeba však počítat i se závislostí činného odporu, která je způsobena povrchovým jevem a patrně se projevuje až pro frekvence v řádech kHz a vyšší. „U ČD byly teoretické rozborů před časem doplněny rozsáhlejším měřením a na tomto základě byly stanoveny mezní hodnoty podélných impedancí pro smyčku kolejnice – kolejnice, viz Tabulka 1.1. Respektovány přitom byly všechny typy svršku od S49 po R65, běžně užívané druhy elektrického propojení jednotlivých kolejnic (svažené kolejnice, měděné přivařované propojky a kombinace obou), což vedlo k stanovení určitého rozpětí (minimálních a maximálních hodnot) pro kmitočty do hodnoty cca 1000 Hz, kde již rozdíly uvedených vlivů nebyly patrné.“[1]

Tabulka 1.1 Velikost parametru z v závislosti na frekvenci³

f [Hz]	z_{\min} [Ω/km]	z_{\min} [Ω/km]	f [Hz]	z [Ω/km]
25	$0,34 \wedge 63^\circ$	$0,40 \wedge 58^\circ$	1000	$9,3 \wedge 81,5^\circ$
50	$0,60 \wedge 68^\circ$	$0,70 \wedge 65^\circ$	2500	$22 \wedge 83,5^\circ$
75	$0,84 \wedge 71^\circ$	$0,94 \wedge 68^\circ$	5000	$43 \wedge 85^\circ$
125	$1,30 \wedge 73^\circ$	$1,45 \wedge 72^\circ$	10000	$85 \wedge 85^\circ$
175	$1,75 \wedge 75^\circ$	$1,95 \wedge 74^\circ$	20000	$168 \wedge 86^\circ$
225	$2,20 \wedge 76^\circ$	$2,40 \wedge 75^\circ$	30000	$247 \wedge 86^\circ$
275	$2,60 \wedge 77^\circ$	$2,85 \wedge 76^\circ$		
325	$3,10 \wedge 78^\circ$	$3,30 \wedge 77^\circ$		
375	$3,50 \wedge 78^\circ$	$3,75 \wedge 77,5^\circ$		
700	$6,40 \wedge 80^\circ$	$6,70 \wedge 80^\circ$		

Parametr y se nazývá měrná příčná admitance a jedná se o veličinu, pro kterou je navrhováno zařízení, které je předmětem této práce. Je tvořena opět reálnou a reaktanční částí. Reálná část reprezentuje velikost svodu mezi jednotlivými pásy a reaktanční velikost kapacity mezi nimi. Vzhledem k tomu, že je kapacitní složka oproti svodové zanedbatelná, označuje se běžně parametr y přímo jako svod. Je dán především izolačními vlastnostmi pražců, nedokonalostí odizolování kolejnic od nich a také např. znečištěním kolejového svršku. Jelikož má na jeho velikost vliv tak velké množství vnějších faktorů, může se hodnota svodu značně lišit. To, že je kapacitní složka oproti reálné zanedbatelná, lze s dostatečnou přesností tvrdit pouze pro signální kmitočty v řádech desítek Hz. S přirozené frekvenční závislosti kapacity plyne, že pro vyšší řády frekvence může být její vliv již zanedbatelný. Otázkou však zůstává do jaké míry. Konkrétní měření či studie, zabývající se tímto problémem, téměř chybí. Navržené zařízení je koncipováno tak, že by mělo alespoň částečně najít i na tuto otázku odpovědi. „Měrná svodová admitance železničního svršku y mezi kolejnicovými pásy bez připojeného ukolejnění nebo jiných částí galvanicky spojených se zemí nebo se sousedními EKÚ u paralelních KO musí být při kmitočtech do 500 Hz:

- u nového nebo obnoveného železničního svršku dráhy celostátní, regionální a vlečky $y \leq 0,33 \text{ S/km}$
- u železničního svršku dráhy celostátní, regionální a vlečky v provozu $y \leq 0,67 \text{ S/km}$
- u železničního svršku dráhy speciální (metra), při upevnění kolejnic na pražcích $y \leq 0,5 \text{ S/km}$ a při bezpražcovém upevnění kolejnic $y \leq 0,05 \text{ S/km}$.“ [7]

³ Převzato z [1]

1.3 Závislost velikosti vstupní impedance na výstupní zátěži

Jelikož je kolejové vedení v případě aplikace kolejových obvodů rozděleno na vodivě oddělené traťové úseky a k jednotlivým úsekům jsou připojeny nejrůznější části výstroje kolejového obvodu, je nutné počítat s ovlivněním vstupní impedance všemi těmito zařízeními. Z teoretických závěrů předchozích kapitol plyne, že pokud bude útlum podélné větve dostatečně veliký pro konkrétní měřicí kmitočet, je možné považovat velikost vstupní impedance kolejového vedení rovnu jeho vlnové impedanci, a to nezávisle na tom, jak je zatížen výstup měřeného vedení. Tento fakt je však nutné jasně definovat a vyvodit přesné závěry pro konkrétní parametry kolejového vedení. Zavedení takového předpokladu je též možné tehdy, je – li velikost vstupní impedance nakrátko⁴ rovna velikosti vstupní impedance naprázdno⁵. Za této situace není možné z pohledu vstupní impedance rozlišit, jak je výstup zatížen a její velikost je pro všechny možné hodnoty zátěže konstantní, rovna vlnové impedanci. Důkaz tohoto tvrzení viz odvození (1.16).

ze vztahu (1.12) plyne \rightarrow (1.16)

$$\rightarrow U_1 = U_2 \cosh(\gamma l) + I_2 Z_0 \sinh(\gamma l)$$

$$\rightarrow I_1 = \frac{U_2}{Z_0} \sinh(\gamma l) + I_2 \cosh(\gamma l)$$

$$Z_{1kratko} = \frac{U_1}{I_1}, \text{ za podm. } U_2 = 0$$

$$Z_{1kratko} = Z_0 \frac{\sinh(\gamma l)}{\cosh(\gamma l)} \quad (1.16)$$

$$Z_{1prazdno} = \frac{U_1}{I_1}, \text{ za podm. } I_2 = 0$$

$$Z_{1prazdno} = Z_0 \frac{\cosh(\gamma l)}{\sinh(\gamma l)}$$

$$Z_0 = \sqrt{Z_{1kratko} Z_{1prazdno}} = \sqrt{Z_0^2} = Z_0$$

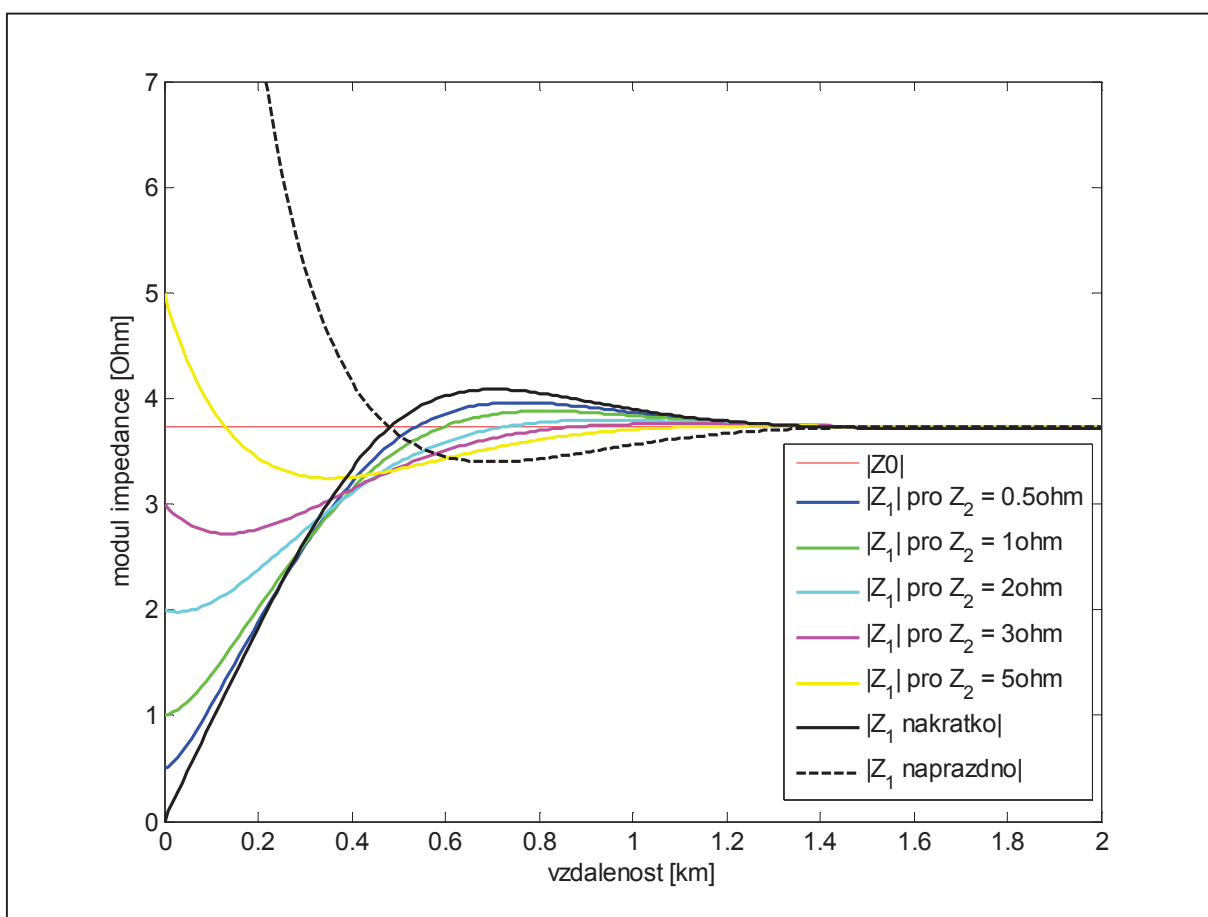
Jelikož zařízení, jehož návrh je předmětem této práce, musí být schopno se známou hodnotou přesnosti fungovat i na pracujícím kolejovém vedení, které je zatíženo výstrojí kolejového obvodu, je rozbor vlivu připojené výstupní zátěže na vstupní měřenou impedanci zásadní. Protože jsou z již provedených měření známy hodnoty měrné podélné impedance (viz Tab. 1.1) a definován vztah pro vlnovou impedanci (viz rovnice (1.15)), je nutné, co

⁴ stav, kdy $U_2 = 0$

⁵ stav, kdy $I_2 = 0$

nejvíce se přiblížit stavu, kdy bude měřená vstupní impedance vedení rovna jeho vlnové impedanci. Za těchto podmínek bude možné porovnáním známých a naměřených hodnot odvodit velikost svodové admitance.

Pomocí výpočetního prostředí MATLAB byly nasimulovány nejrůznější možnosti zatížení kolejového vedení a byly vytvořeny grafy závislosti velikosti vstupní impedance na vzdálenosti připojení konkrétní zátěže k měřenému vedení. Na Obr. 1.4 jsou znázorněny průběhy velikostí modulů vstupních impedancí na vzdálenosti bodu připojení zátěže od počátku vedení pro její definované hodnoty. Model je vytvořen pro vedení, které je buzeno harmonickým signálem o kmitočtu 1 kHz. Je tedy zvolena příslušná hodnota měrné podélné impedance dle Tab. 1.1 a velikost měrné svodové admitance byla zvolena jako normativní maximální hodnota $y = 0,67 \text{ S/km}$.



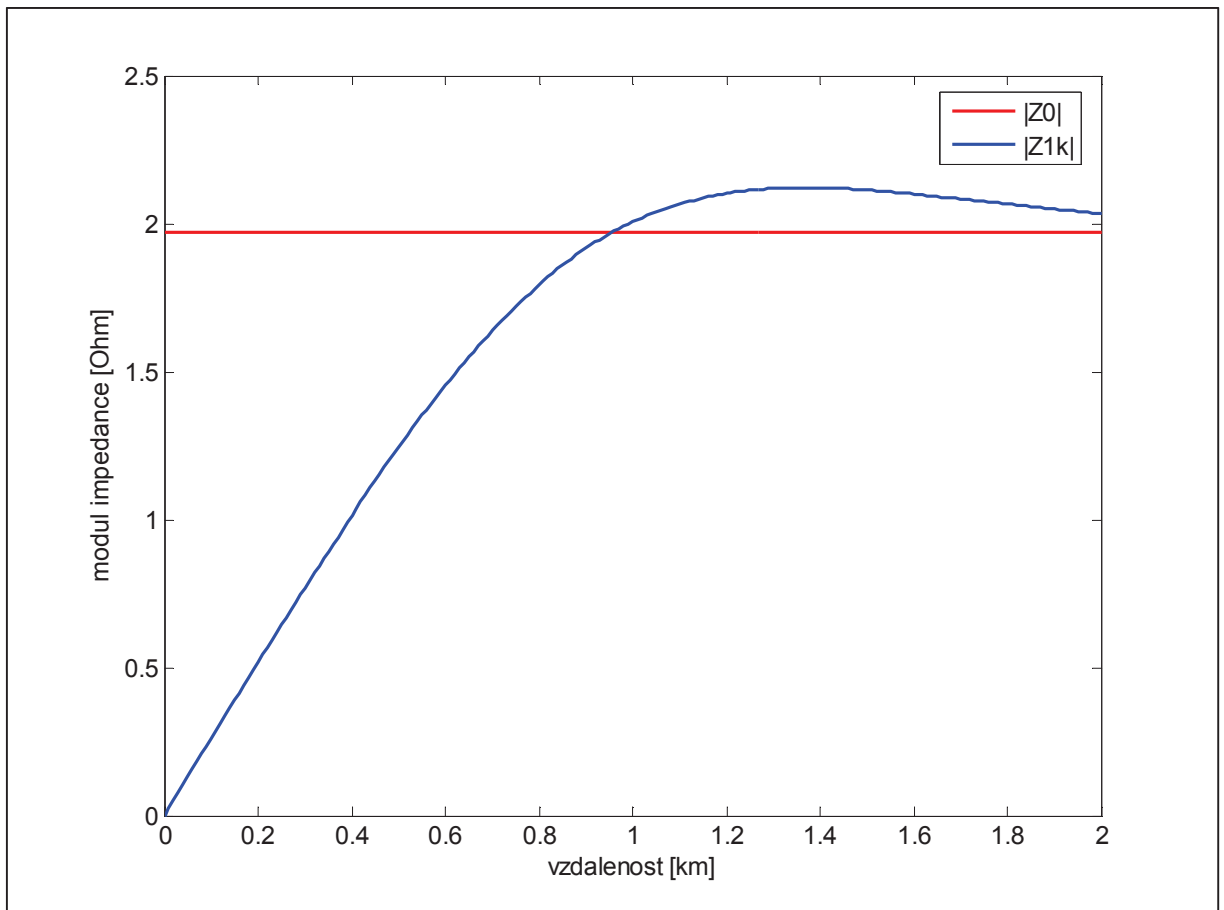
Obrázek 1.4 Závislost velikosti měřené impedance na vzdálenosti připojení příslušné zátěže⁶

Z průběhů na Obr. 1.4 plyne několik závěrů. Je zde graficky dokázáno, že velikost vstupní impedance naprázdno a nakrátko vychází z opačných limitních hodnot (nula a

⁶ Příslušný kód pro vytvoření modelu v prostředí MATLAB je v Příloze A Tab. A1

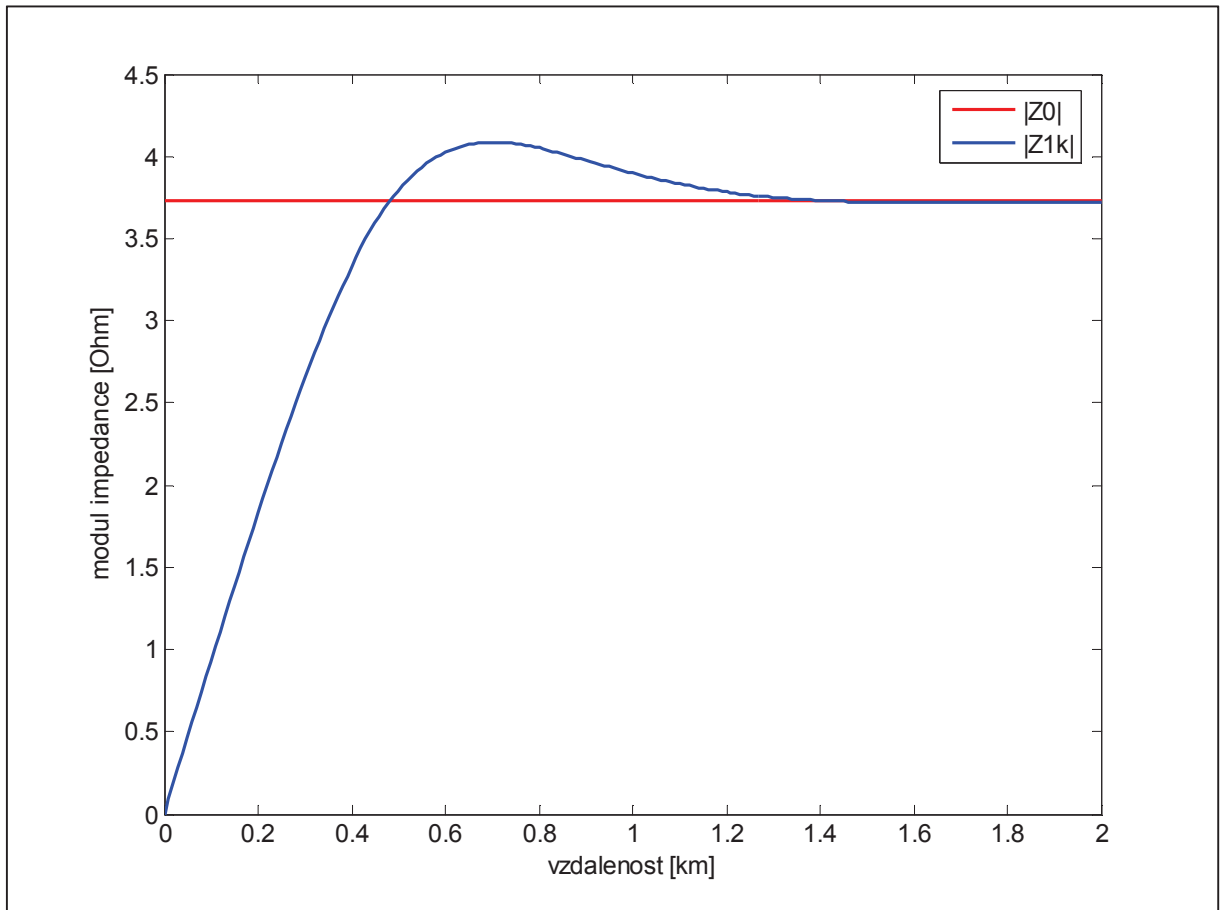
nekonečno) a v osové symetrii k přímce, reprezentující velikost vlnové impedance, identicky konvergují k této hodnotě. Průběhy pro hodnoty ostatních zátěží vedení se nachází dle očekávání mezi těmito extrémními stavy. Další přínos tohoto modelu je v tom, že je možné jasně určit, od jaké vzdálenosti připojení zátěže od bodu měření můžeme s danou chybou považovat velikost vstupní impedance rovnou velikosti vlnové impedance.

Na Obr. 1.5 a 1.6 je výsledek simulace, kdy je konkrétní kolejové vedení buzeno harmonickými signály o různých frekvencích, konkrétně 1 kHz a 275 Hz. Pro model jsou opět zvoleny příslušné hodnoty měrných podélných impedancí dle Tab. 1.1 a měrná svodová admitance $y = 0.67 \text{ S/km}$. Z průběhů je patrné, že skutečně platí fakt, že s rostoucí frekvencí, resp. podélnou měrnou impedancí, je možné se známou chybou zanedbat velikost připojené zátěže u vyšších frekvencí pro daleko kratší vzdálenosti připojení této zátěže od bodu měření.



Obrázek 1.5 Kolejové vedení nakrátko, buzeno signálem o kmitočtu 275 Hz⁷

⁷ Příslušný kód pro vytvoření modelu v prostředí MATLAB je v Příloze A Tab. A2



Obrázek 1.6 Kolejové vedení nakrátko, buzeno signálem o kmitočtu 1 kHz⁸

Veškeré tyto teoretické závěry jsou nezbytné pro správné zvolení měřicího signálu navrhovaného zařízení a pro jasné definování chyby a podmínek měření. Tento úkol je řešen v příslušné následující kapitole.

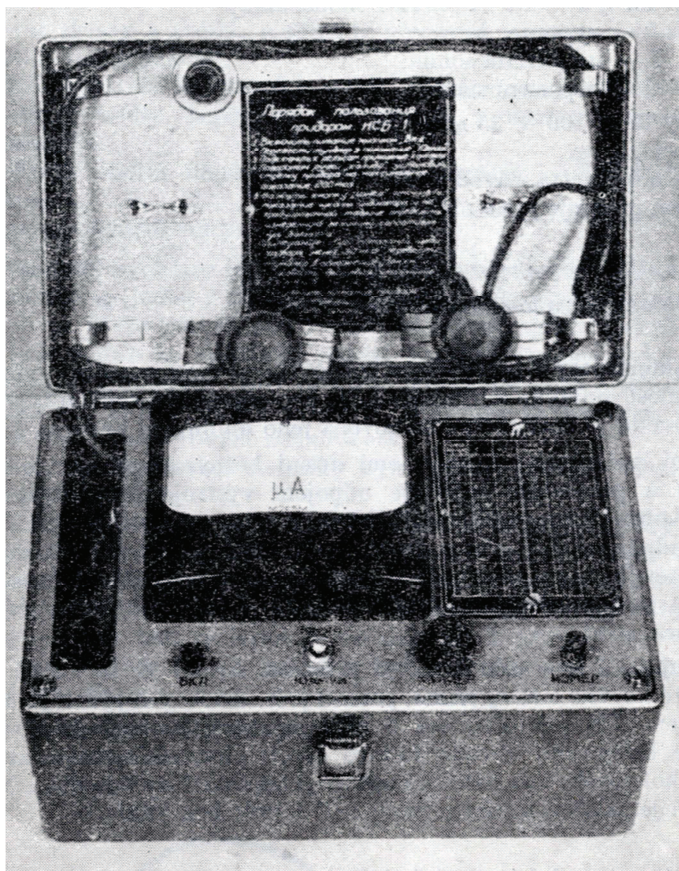
⁸ Příslušný kód pro vytvoření modelu v prostředí MATLAB je v Příloze A Tab. A2

2 Měřicí metoda

V této kapitole je popsán obecný princip měřicí metody, která byla pro zařízení navržena. Bylo nutné zvolit nejen vhodný měřicí řetězec, ale také určit charakter a vlastnosti měřicího signálu. Stručně je rozebrán princip zařízení, které se dosud pro měření svodové admitance používá.

2.1 Indikátor stavu kolejového lože ISB1

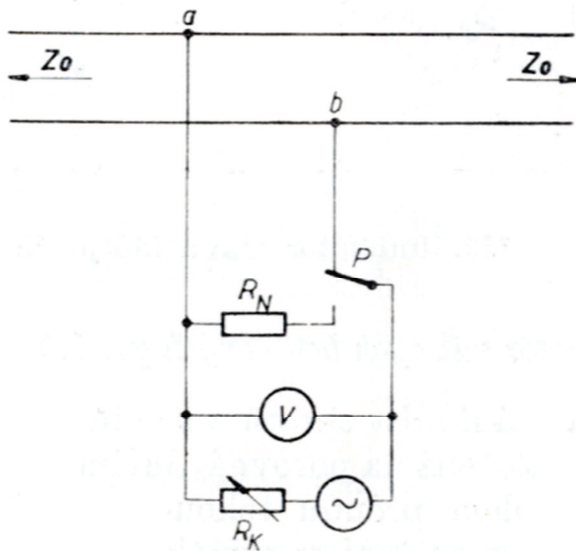
Nejjednodušší dříve používanou metodou měření svodového odporu kolejnic bylo jednoduché měření ohmovou metodou stejnosměrným proudem. Tento postup však přináší základní problém, a to nutnost odpojení všech prvků výstroje. Takovéto měření je tedy aplikovatelné prakticky jen při aktivaci nového železničního svršku, který ještě výstrojí osazen nebyl.



Obrázek 2.1 Indikátor stavu kolejového lože ISB1⁹

⁹ Převzato z [2]

Na počátku 70. let 20. století byl v bývalém Sovětském svazu vyvinut měřicí přístroj ISB1 (Obr. 2.1), který s přesností cca 10% dokáže hodnotu svodu určit i za předpokladu připojené výstroje kolejových obvodů. Princip zařízení je založen na faktu, že při měřicím kmitočtu cca 5 kHz se kolejový obvod (úsek 200 – 300m) jeví jako elektricky nekonečné vedení. Jeho vstupní impedance je pak rovna impedanci vlnové. Teoretické odvození viz kapitola 1.3.



Obrázek 2.2 Princip měření s přístrojem ISB1¹⁰

Princip měření je znázorněn na Obr. 2.2. „Pro měření se využívá vysokoimpedanční tónový generátor, jehož vnitřní odpor značně převyšuje vstupní impedanci kolejového obvodu v bodech a a b . To zaručuje, že zátěž (kolejový obvod) je napájena konstantním proudem. Výsledkem je, že napětí na zátěži je přímo úměrné odporu mezi body a a b , který je roven polovině hodnoty charakteristické impedance. Přepínačem P přepínáme normálový odpor R_N , sloužící k nastavení přístroje.“[2] Zmiňovaný zdroj měřicího signálu je tvořen LC generátorem. Celé zařízení je postaveno na čistě analogovém zpracování, které je řešeno v době vzniku konstrukce dostupnou tranzistorovou technologií, doplněnou o příslušné pasivní součástky, jako transformátorky, kondenzátory, rezistory atd. Pro použití v dnešní době je zařízení ISB1 téměř nepoužitelné. Jde především o to, že je naprosto neodolné vůči rušení, které je produkováno dnes široce nasazenou elektrickou trakcí. Tento důvod přináší nutnost provozních výluk měřených traťových úseků, což je naprosto nepřijatelný fakt. Další nezanedbatelnou nevýhodami je i značný rozměr a hmotnost zařízení. Úkolem této práce je nalézt takové řešení měřicího přístroje, které veškeré zmiňované nedostatky odstraní.

¹⁰ Převzato z [2]

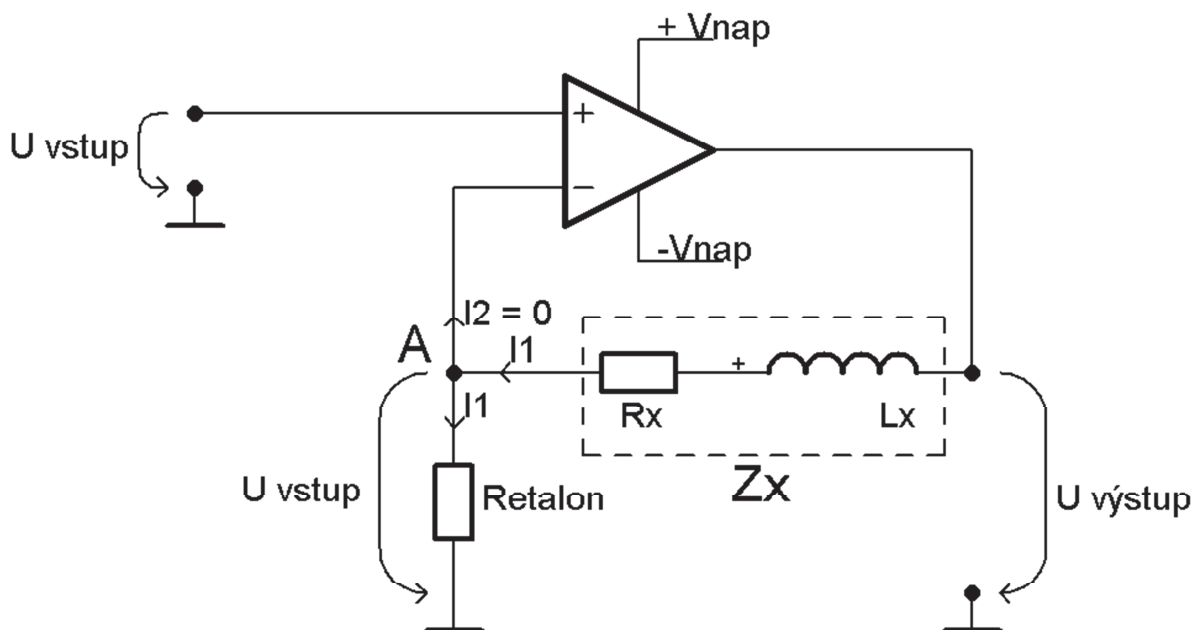
2.2 Měření obecné impedance pomocí neinvertujícího zapojení s OZ

Jelikož je možné za určitých předpokladů (viz kapitola 1.3) považovat vstupní impedanci kolejevého vedení rovnu charakteristické vlnové impedanci, je možné přistupovat k měřenému objektu jako k obecné impedanci. Takováto veličina se skládá z reálné a imaginární složky (vztah 2.1). Velikost reálné složky je přímo velikostí odporu náhradního dvojbranu a velikost indukčnosti je dána vztahem 2.2.

$$x = \operatorname{Re}\{x\} + j * \operatorname{Im}\{x\} \quad (2.1)$$

$$\operatorname{Re}\{x\} = R; \operatorname{Im}\{x\} = 2\pi fL \quad (2.2)$$

Na základě informací z [4] je možné obecnou impedanci, a to jak velikost modulu, tak i fázový úhel, měřit pomocí základního zapojení neinvertujícího zesilovače s OZ. Tato metoda přináší možnost vytvoření zařízení, které je někdy označováno jako převodník impedance na napětí. Principiální schéma zapojení je na Obr. 2.3.



Obrázek 2.3 Principiální schéma

Jelikož ze základních vlastností operačního zesilovače platí, že mezi vstupními svorkami (invertující a neinvertující vstup) je bez ohledu na připojenou operační síť nulové napětí, tzv. princip virtuální nuly, objeví se vstupní napětí U_{vstup} , kterým je buzen neinvertující vstup také na vstupu invertujícím. Vznik tohoto napětí je umožněn proudem I_1 , který teče z výstupu OZ

přes měřenou impedanci Z_x (ve schématu nahrazena ekvivalentním odporem R_x a ekvivalentní indukčností L_x), která tvoří v operační síti zápornou zpětnou vazbu. Jelikož větví, která vede od uzlu A do invertujícího vstupu, nemůže téct žádný proud (vstupní impedance ideálního OZ je nekonečně velká), teče stejný proud I_1 také větví od uzlu A přes etalonový odpor R_{etalon} .

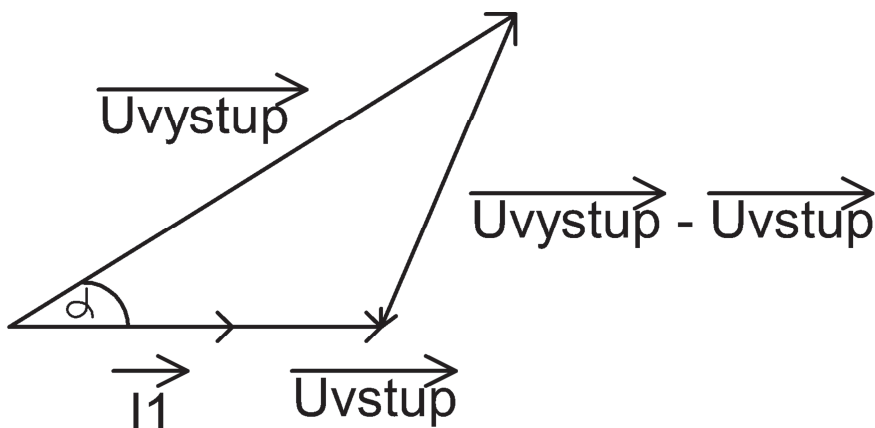
Uvažujme – li, že je vstup buzen harmonickým signálem platí:

$$U_{vstup}(t) = \sin(2\pi ft) \quad (2.3)$$

$$I_1(t) = \frac{U_{vstup}(t)}{R_{etalon}}$$

$$Z_x = \frac{U_{vystup}(t) - U_{vstup}(t)}{I_1(t)}$$

Ze vztahů (2.3) je patrné, že ze znalosti průběhů napětí U_{vstup} a U_{vystup} a velikosti etalonového odporu R_{etalon} je možné přesně určit impedanci Z_x . Jelikož je R_{etalon} čistě reálná zátěž, je možné prohlásit, že napětí ($U_{vstup}(t)$) i proud, který jím prochází ($I_1(t)$) jsou ve fázi. Jelikož zpětnou vazbou, která je tvořena impedancí Z_x protéká stejný proud $I_1(t)$, musí napětí U_{vystup} fázově předcházet (v případě indukčního charakteru impedance) proudu $I_1(t)$ úměrně velikosti imaginární složky $\text{Im}\{Z_x\}$. Z těchto jevů je možné určit nejen velikost modulu $|Z_x|$, která se projevuje změnou amplitudy napětí U_{vystup} oproti U_{vstup} , ale také fázor, který odpovídá zmiňovanému fázovému zpoždění obou napětí. Tato teoretická rozvaha je znázorněna na fázorovém diagramu na Obr. 2.4.



Obrázek 2.4 Fázorový diagram

2.3 Volba měřicího signálu

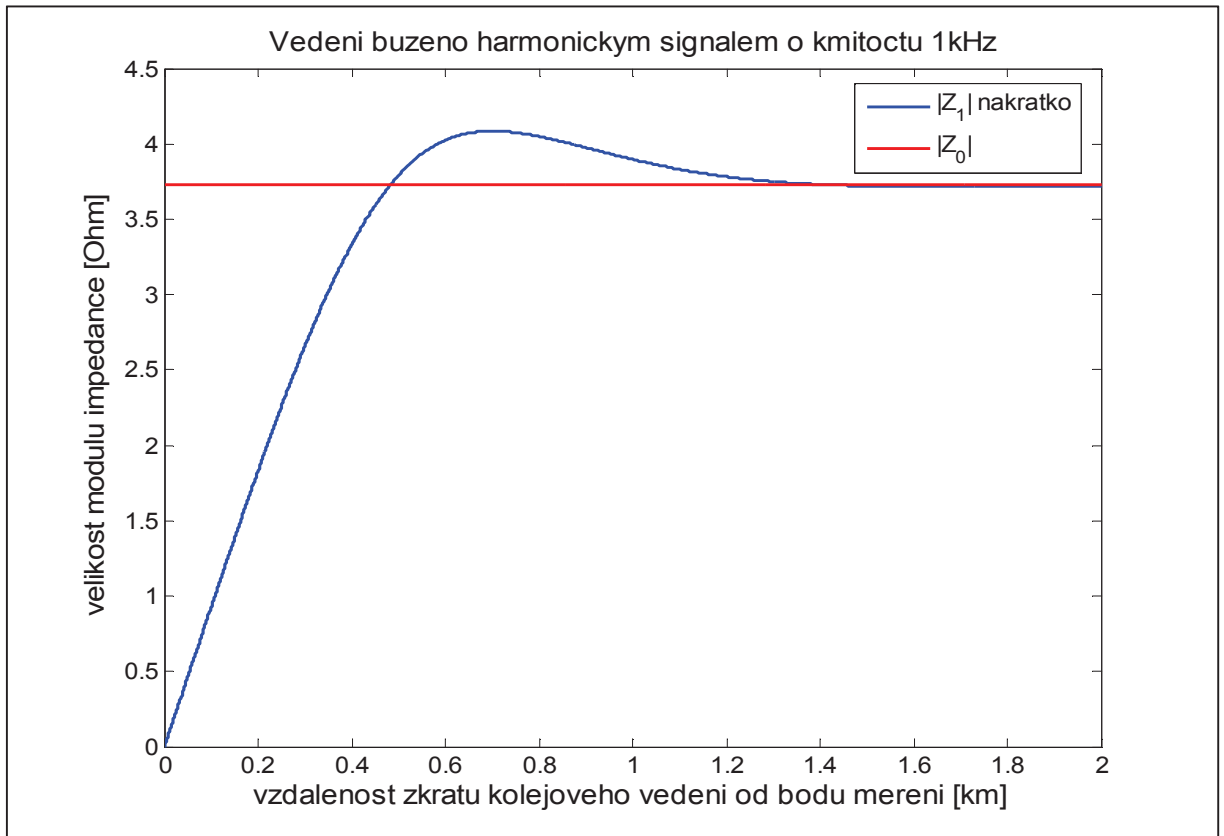
Pro použití měřicí metody (viz kapitola 2.2) je nutné definovat vhodný měřicí signál. Principiálně by jím mohl být libovolný harmonický signál. Pro měření svodové admitance kolejového vedení je však nutné brát v potaz především závěry vyplívající z kapitoly 1.3. Je tedy nutné zvolit kmitočet měřicího signálu a jasně nadefinovat podmínky, které musí být dodrženy, aby bylo možné s použitím tohoto konkrétního signálu dosáhnout minimální a jasně definované chyby měření.

2.3.1 Volba z hlediska podélného útlumu vedení

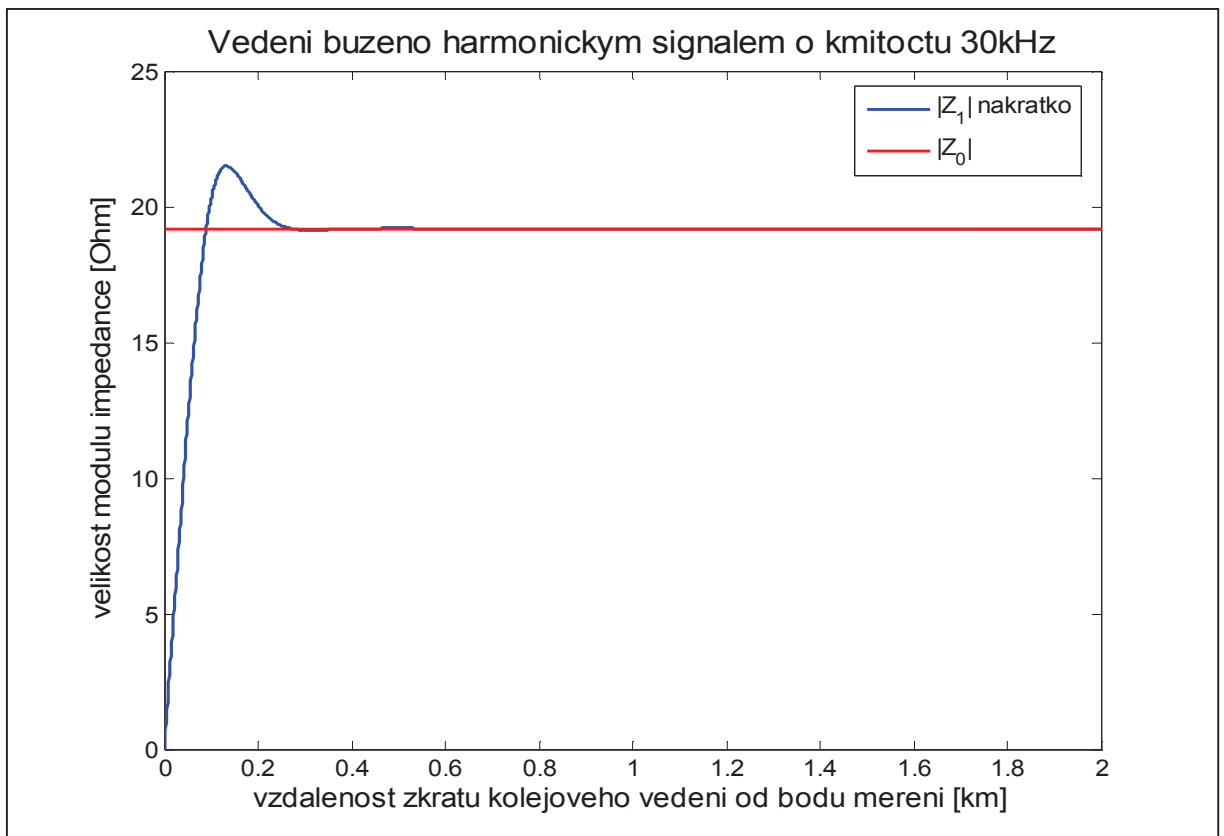
Jelikož pro určení svodové admitance y z naměřené hodnoty Z_0 potřebujeme znát přesnou hodnotu podélné impedance z (vztah 2.4), je první kritérium výběru kmitočtu jasně dané tabulkou 1.1, která definuje hodnoty z pro konkrétní kmitočty.

$$y = \frac{z}{Z_0^2} \quad (2.4)$$

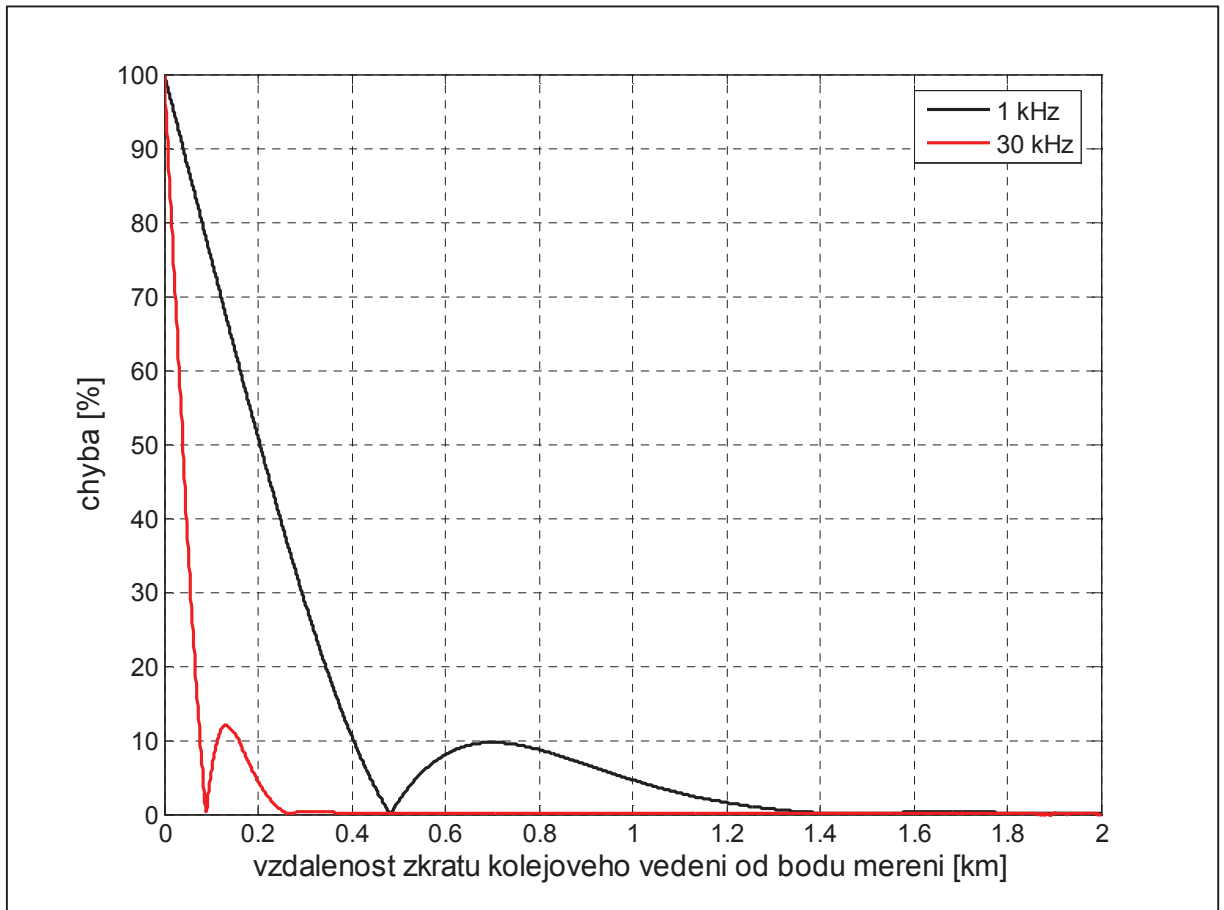
Jelikož jako signální kmitočty pro kolejové obvody jsou používány frekvence 75 a 275 Hz, je použití těchto hodnot nemožné. Zároveň je nutné vybrat dostatečně vysokou hodnotu, aby bylo možné prohlásit, že je vstupní měřená impedance rovna vlnové za jasně definovaných podmínek. Pro tuto rozvahu bylo opět využito modelu kolejového vedení, který byl vytvořen v prostředí MATLAB. Příslušný zdrojový kód je v Příloze A Tab. A3. V následující rozvaze je brán zkrat kolejového vedení jako nejsilnější ovlivnění vedení, které může nastat a je třeba s takovýmto stavem počítat a zamezit, aby mělo neznámý vliv na chybu měření. Na Obr. 2.5 je znázorněna závislost vstupní impedance vedení nakrátko, které je buzeno signálem o frekvenci 1 kHz, na vzdálenosti zkratu od bodu měření a současně je zobrazena i hodnota vlnové impedance takového vedení. Na Obr. 2.6 je ta samá závislost, ovšem pro vedení, které je buzeno harmonickým signálem o frekvenci 30 kHz. Na Obr. 2.7 jsou znázorněny průběhy chyb měření v závislosti na místě zkratu, které jsou vyjádřeny z absolutní hodnoty odchylky vstupní impedance pro jednotlivé vzdálenosti zkratu vedení od velikosti vlnové impedance.



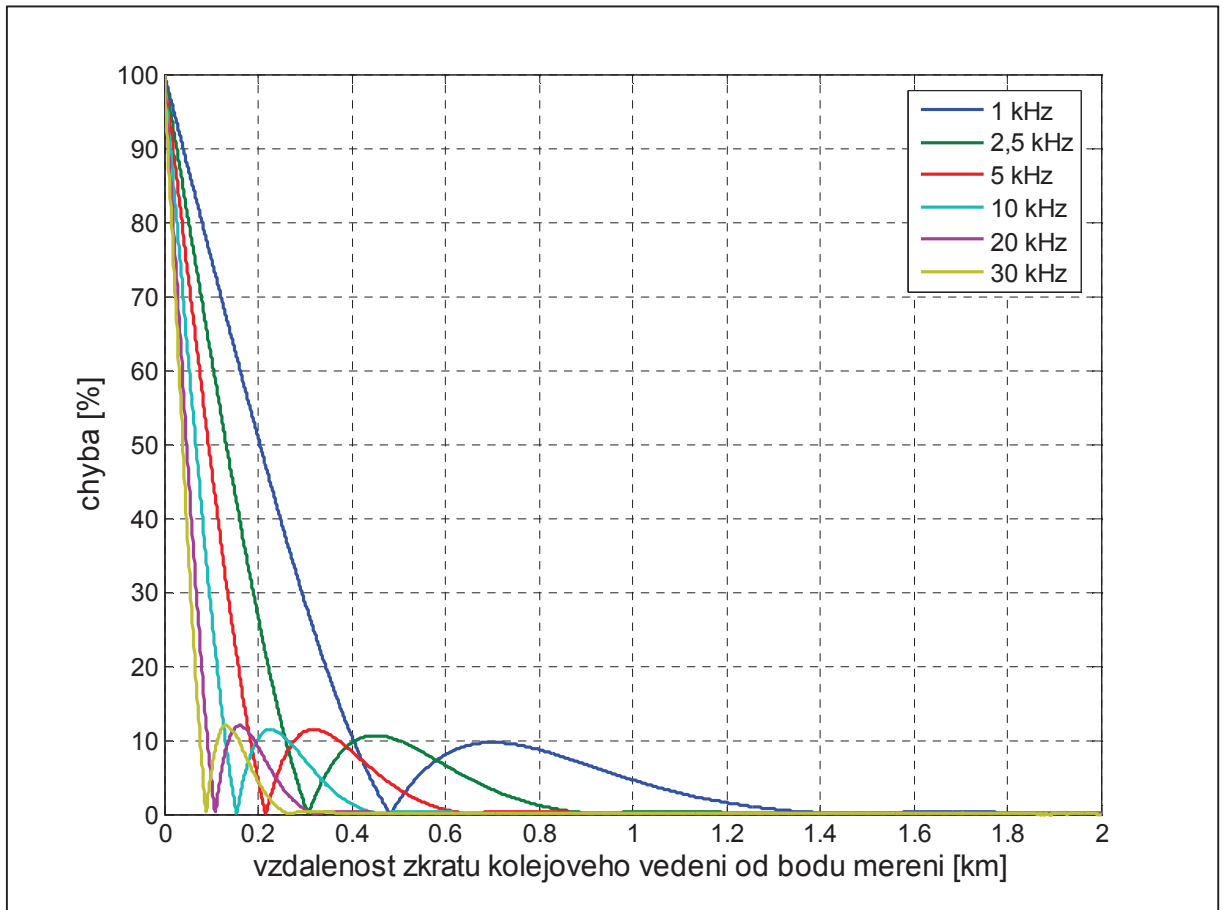
Obrázek 2.5 Vstupní impedance nakrátko



Obrázek 2.6 Vstupní impedance nakrátko

**Obrázek 2.7 Chyba měření**

Pokud budeme sledovat čistě jen cíl měřit hodnotu impedance s nějakou mezní přesností rovnu vlnové impedanci, docházíme k závěru, že je nejvhodnější zvolit co nejvyšší možný kmitočet. Problém je ovšem v tom, že fakt plynoucí z Obr. 2.7 neznámá, že pro vzdálenosti již s nulovou chybou měření získáváme naprosto přesnou hodnotu. Je nutné si uvědomit, že pokud zkrat v takto vzdálených bodech již není možné měřením detekovat, znamená to, že ani případnou změnu parametrů kolejového vedení, která je způsobena například špatným odizolováním kolejnice není možné taktéž měřením detekovat. Hranice, při kterých chyba měření klesá k nule, nám tedy také určují hranice úseku, který je měřen. Hledáme tedy kompromis mezi délkou úseku, který je měřen, a minimální vzdáleností od bodu měření, ve které nesmí být vedení nijak zatíženo. Na Obr. 2.8 jsou zobrazeny průběhy chyb měření pro případy buzení různými frekvencemi.



Obrázek 2.8 Průběhy chyb měření

Protože je vhodné pro odhalení nepřesností provádět měření alespoň na dvou odlišných kmitočtech a jelikož je výběr z uvedených frekvencí úvahou o kompromisu, jako nejlogičtější se jeví zvolit frekvence 5 kHz a 10 kHz, které jsou ve středu seznamu možných hodnot.

2.3.2 Řešení odolnosti vůči rušivým vlivům trakčního proudu

Navrhované zařízení má být schopno odolat i rušivým vlivům, které způsobuje průtok zpětného trakčního proudu kolejnicemi. Pro rozvalu nad volbou kmitočtu z tohoto hlediska byla poskytnuta data z VÚŽ¹¹. Jedná se o vzorkované průběhy trakčního proudu, který opouští hnací vozidlo do kolejnicových pasů. V Tabulce 2.1 jsou přiřazena čísla obrázků odpovídající technologii hnacího vozidla a druhu trakčního napájení. Jelikož bylo vzorkováno frekvencí 44,1 kHz, je maximální možná hodnota frekvence, která se v příslušném amplitudovém spektru zobrazí 22,05 kHz, protože platí Shannon – Kotělnikovův vzorkovací teorém¹². Analýza signálů byla provedena v prostředí MATLAB. Příslušný zdrojový kód je v Příloze A Tab. A4.

Tabulka 2.1 Přiřazení výsledků rozboru

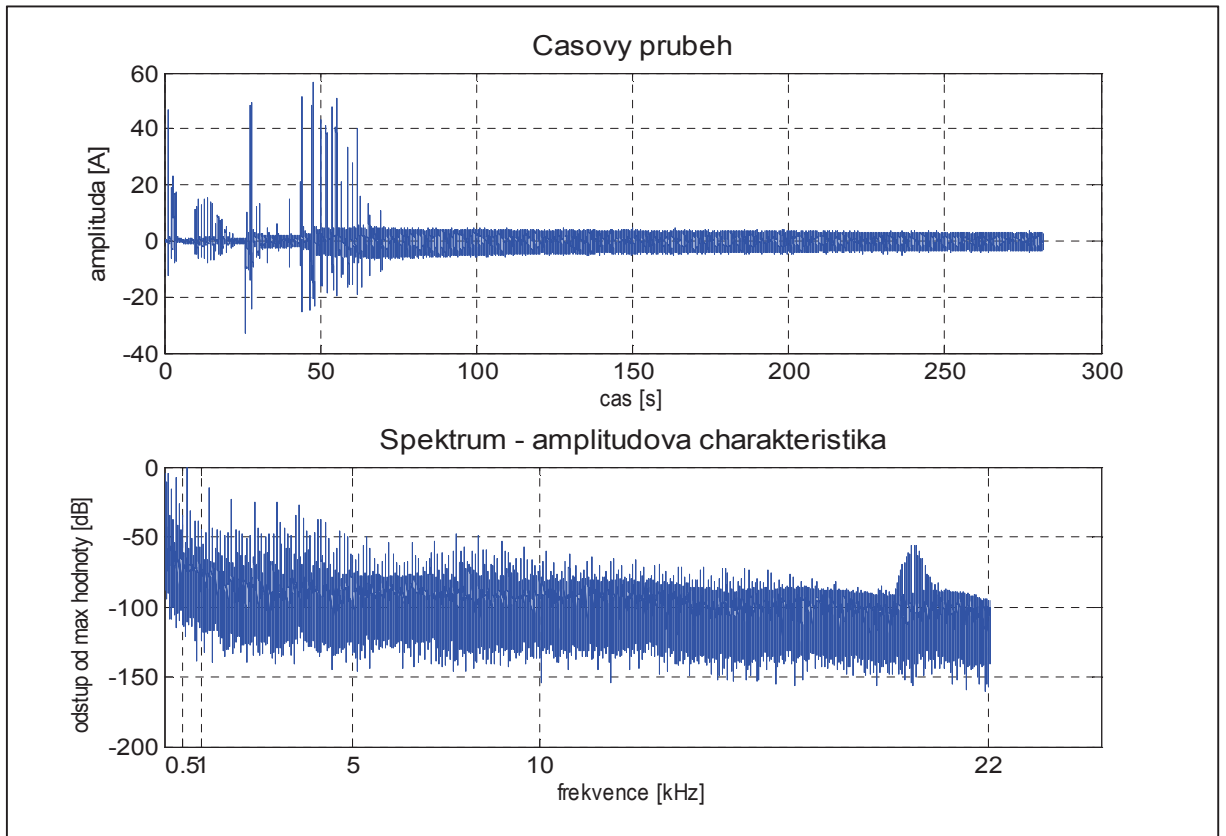
druh hnacího vozidla	trakce 3 kV SS	25 kV 50 Hz STŘ
odporově (stykačově) řízené hnací vozidlo	Obr. 2.9	Obr. 2.10
trakční měnič hnacího vozidla používající spínacích prvků IGBT ¹³	Obr. 2.11	Obr. 2.12
centrální zdroj energie hnaných vozidel	Obr. 2.13	Obr. 2.14
trakční měnič hnacího vozidla používající spínacích prvků GTO ¹⁴	-	Obr. 2.15

¹¹ Výzkumný ústav železniční

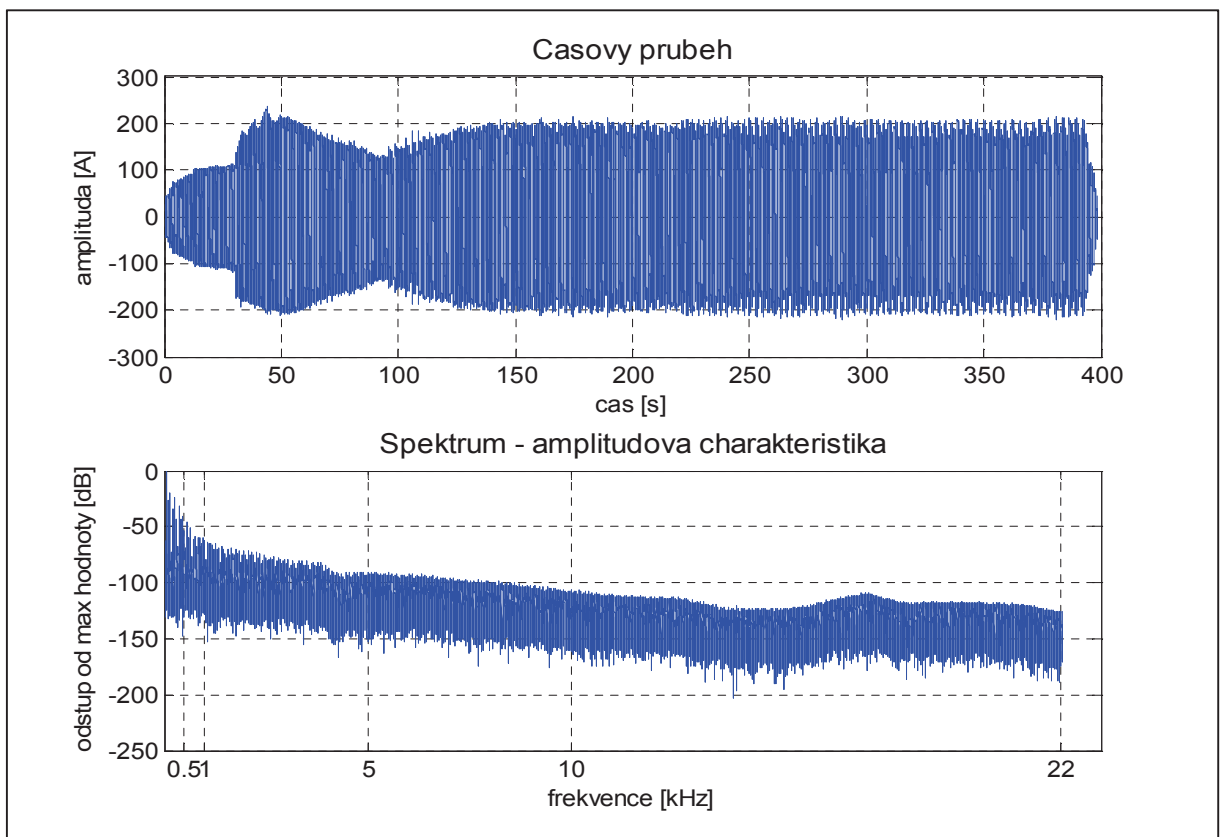
¹² maximální reprodukovatelná $f = fv_z/2$, pro vyšší f nastává aliasingový jev

¹³ bipolární tranzistor s izolovaným hradlem (nejnovější technologie)

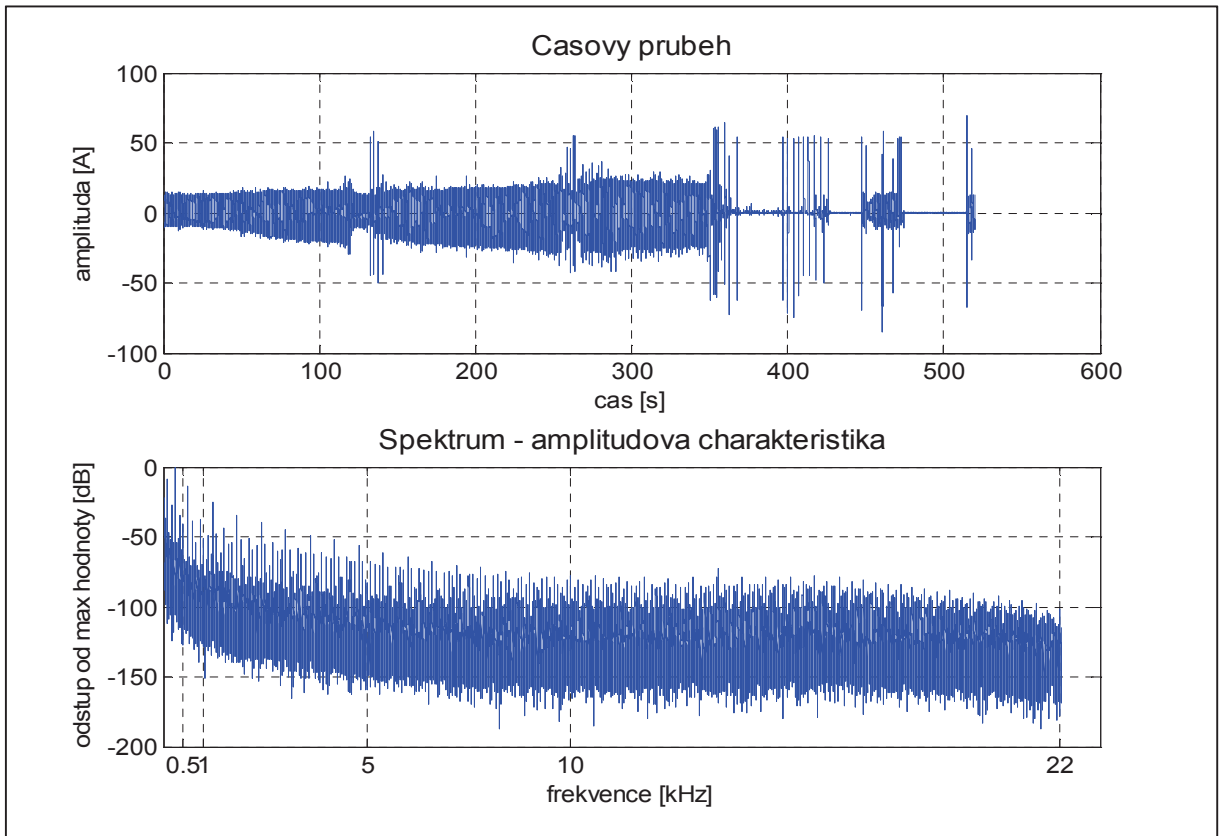
¹⁴ vypínací tyristor (předchůdce IGBT)



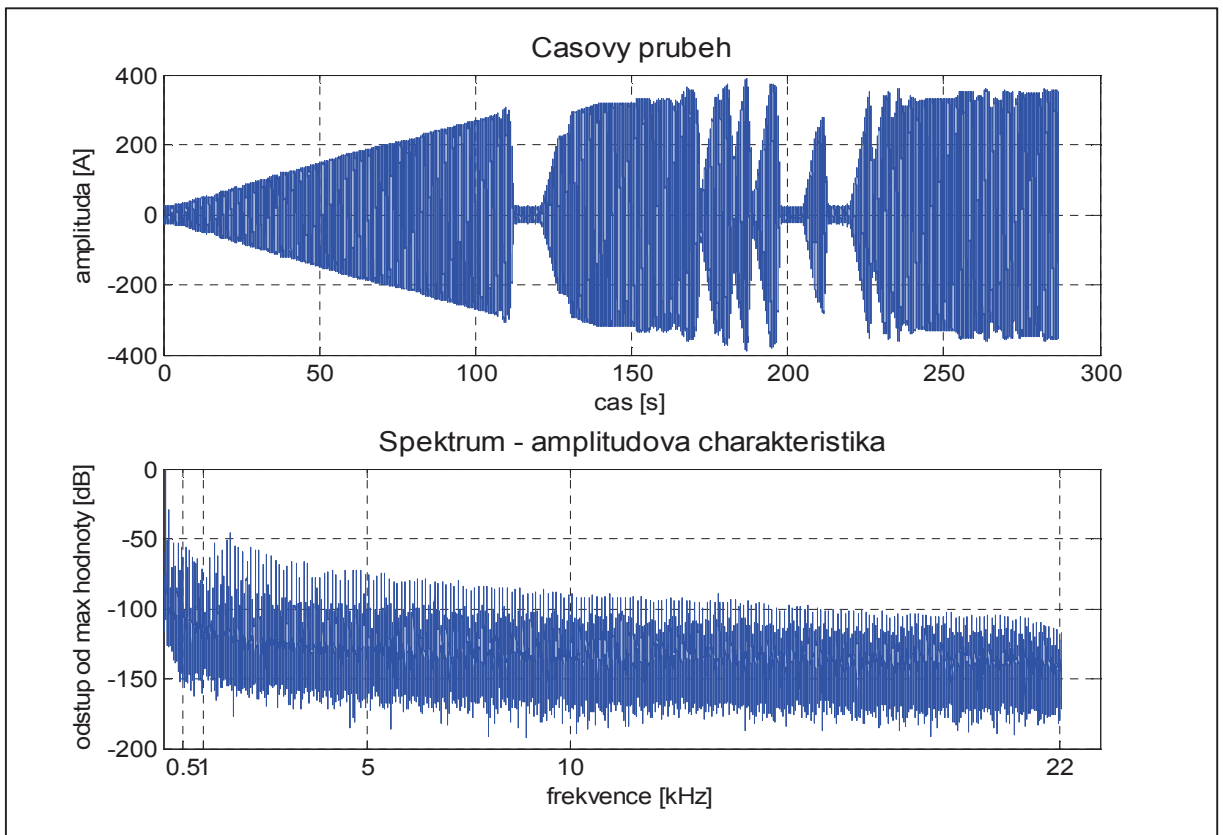
Obrázek 2.9 Odporově řízené hnací vozidlo, SS trakce



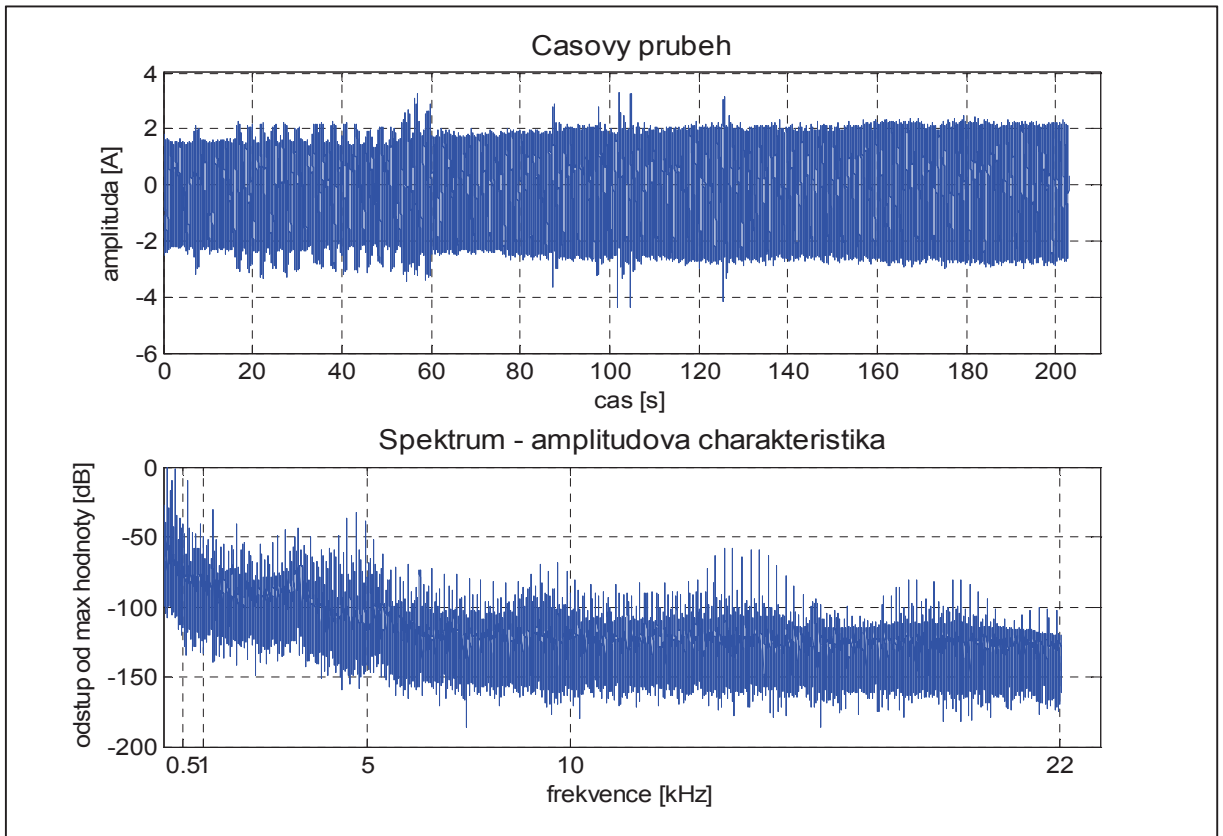
Obrázek 2.10 Odporově řízené hnací vozidlo, STR trakce



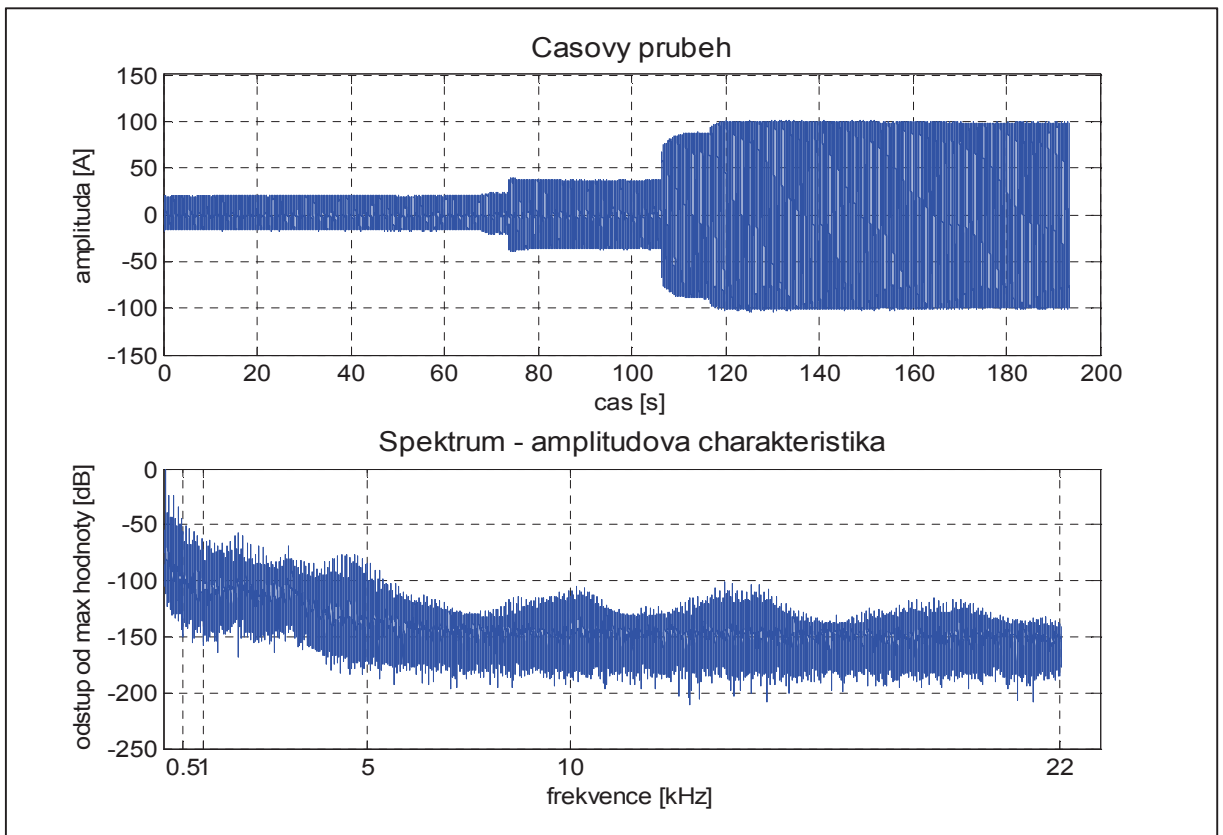
Obrázek 2.11 Trakční měnič se spínacími prvky IGBT, SS trakce



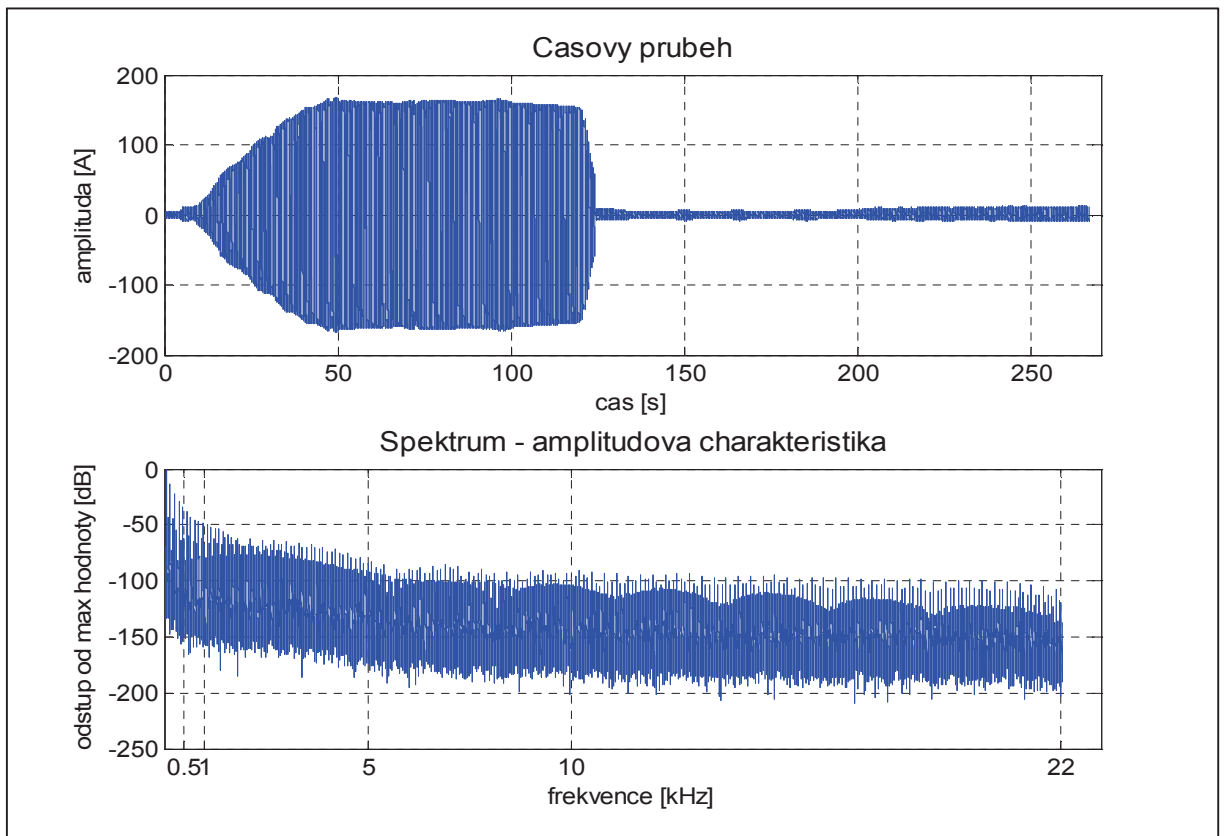
Obrázek 2.12 Trakční měnič se spínacími prvky IGBT, STR trakce



Obrázek 2.13 Centrální zdroj energie hnaných vozidel, SS trakce



Obrázek 2.14 Centrální zdroj energie hnaných vozidel, STR trakce



Obrázek 2.15 Trakční měnič se spínacími prvky GTO, STŘ trakce

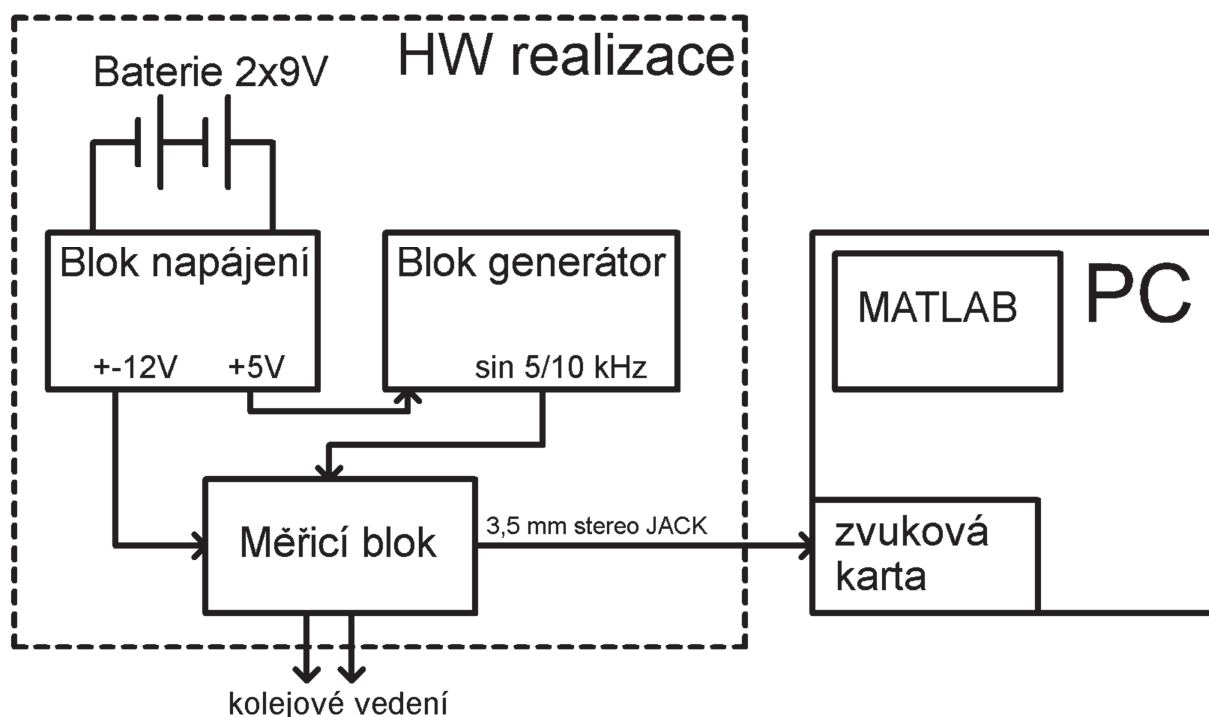
Z časových průběhů je patrné, že měřená sekvence odpovídá různým režimům funkce trakčního motoru. První část odpovídá plynulému rozjezdu vozidla, druhá volnoběžné jízdě a třetí část odpovídá rekuperačnímu brždění. Analýzou celé sekvence je tak možné získat skutečně reprezentativní spektrum, které respektuje všechny možné druhy emisního signálu. Ze získaných amplitudových spekter je patrné, že naprostá většina energie signálu se nachází v oblasti desítek až stovek Hertz. Od frekvencí v řádu kHz již odstup od maximální hodnoty, která se nachází většinou v oblasti desítek Hz, dramaticky roste. Je tedy možné prohlásit, že zvolené kmitočty 5 kHz a 10 kHz nebudou dramaticky rušeny. Při vhodně zvolené číslicové filtraci bude možné naprosto bezpečně takovéto měřicí frekvence využít.

3 Návrh a realizace zařízení

V následujících podkapitolách je popsán jak celkový princip navrženého zařízení, tak jsou podrobně popsána řešení jednotlivých bloků měřicího řetězce.

3.1 Návrh měřicího řetězce

Principiální návrh zařízení je postaven na metodě tzv. virtuálního měřicího přístroje. Tento přístup znamená, že veškeré vysílací a detekční prvky jsou fyzicky realizovány jako samostatné zařízení a hlavní výpočetní jádro systému je vytvořeno softwarově na platformě PC. Konkrétně je výpočetní jádro realizováno v prostředí MATLAB. Zpracování dat je prováděno offline. Prostřednictvím zvukové karty je navzorkován do souboru wav¹⁵ stereo signál, který je výstupem měřicího bloku a dále je tento soubor zpracován ve skriptu v prostředí MATLAB. Pro spojení analogových dat hardwarové části a softwarového výpočetního jádra je využita standartní zvuková PC karta. Popsaná struktura je znázorněna blokovým schématem měřicího řetězce na Obr. 3.1.



Obrázek 3.1 Blokové schéma měřicího řetězce

¹⁵ waveform audio file format, zvukový formát bez komprese

3.2 Blok napájení

V Příloze B na Obr. B1 je elektrické schéma zapojení napájecího bloku. Vstupem je napájení dvěma v sérii zapojenými bateriemi standardního typu 9 V. Jedná se o dva akumulátory technologie NiMH¹⁶, která umožňuje podstatně větší proudové zatížení než standardní primární články, a jelikož se jedná o akumulátory, je i jejich použití podstatně ekonomičtější, neboť je možné jejich dobítí.

Srdcem celého bloku je DCDC měnič od společnosti Traco Power typ TEN 4-2422. Jedná se o měnič s účinností 83 %. Obvod je vybaven ochranou proti přepólování vstupního napájení, ochranou proti zkratu výstupních svorek. Je speciálně navržen pro použití v nejrůznějších bateriově napájených mobilních zařízeních. Konstrukcí speciálního pouzdra je zajištěna spolehlivá funkce až do teploty 75 °C, aniž by bylo nutné použít externí prostředky chlazení. Tento konkrétní model má rozsah vstupního napětí 9 -36 V, proto bylo zvoleno napájení 2 x 9 V v sérii, tedy 18 V. Skutečná hodnota je ještě zhruba o 1 V vyšší, neboť použité akumulátory typu NiMH obsahují 8 článků po 1,2 V, namísto standardního počtu 7 článků. Jako dodatečná ochrana proti proudovému přetížení je vstupu předřazena tavná pojistka pro maximální hodnotu proudu 250 mA. Výstupem měniče jsou pak dvě bipolární napěťové hladiny +12 V a -12 V, které mohou být zatíženy v každé větvi odběrem proudu až 165 mA.

Pro napájení bloku generátoru je potřeba ještě napěťová hladina +5 V. Ta je vytvořena pomocí standardního lineárního stabilizátoru napětí typu 7805, který je připojen k větvi napěťové hladiny +12 V. Na výstupu tohoto stabilizátoru je připojena indikační LED dioda, která signalizuje funkci celého bloku. Všechny tři napěťové hladiny jsou vyvedeny na konektorové propojky.

3.3 Blok generátoru měřicího signálu

Elektrické schéma zapojení tohoto bloku je v Příloze B na Obr. B2. Úkolem zapojení je generování frekvenčně stabilních harmonických průběhů o frekvencích 5 kHz a 10 kHz.

K řešení tohoto úkolu jsem využil jednoduchého 8 bitového mikrokontroléru od firmy ATMEL model AT89C2051, kterým generuji frekvenčně stabilní obdélníkový signál se střídou 1 o příslušných frekvencích. Stabilita takto generovaného průběhu je co do hodnoty

¹⁶ Niklmetalhydrid

frekvence závislá převážně jen na stabilitě krystalu, který jednočipovému počítači vytváří vnitřní hodiny. Frekvenční tolerance této součástky je 30 ppm¹⁷, což je naprosto zanedbatelná hodnota. Dle typického zapojení, vycházejícího z datasheetu mikrokontroléru, je obsluhováno tlačítko RESET, zvoleny blokovací kondenzátory na napájecích svorkách a zapojen krystal o frekvenci 12 MHz. Zdrojový kód, napsaný v jazyce C, kterým byl vytvořen program mikrokontroléru, je v Příloze A Tabulka A5. Bránou P 1.7 je generován obdélníkový signál o frekvenci 10 kHz, a P 1.6 signálu o kmitočtu 5 kHz. Přes přepínač SW_5/10kHz je jeden z kmitočtů veden na dělič, který je tvořen odporem RG3 a potenciometrem o velikosti 5 kΩ s lineární změnou hodnoty. Odtud je již obdélníkový signál s nastavenou amplitudou veden na vstup obvodu MAX 7403.

Integrovaný obvod MAX 7403 je eliptický filtr typu dolní propust osmého řádu. Jedná se o nízkopříkonové zařízení, které je vhodné pro použití v bateriově napájených zřízeních. Vhodným připojením kondenzátoru mezi vývod CLK a zem je možné vyvolat běh vnitřních hodin, které v poměru 100 : 1 určují zlomovou frekvenci filtru. Zvolená hodnota 10 pF odpovídá zlomové frekvenci 15 kHz a 33 pF 7,8 kHz. Přepínač SW_FILTR je zapojen v příslušné orientaci společně s přepínačem SW_5/10kHz, aby bylo zajištěno připojení správné hodnoty kapacity ke konkrétní hodnotě kmitočtu vstupního obdélníkového signálu. Jelikož z teorie signálů platí, že spektrum obdélníkového signálu je tvořeno základní harmonickou frekvencí a ideálně nekonečným rozvojem vyšších harmonických, které postupně utvářejí dokonalý obdélníkový průběh v časové oblasti, je možné z takového signálu získat pouze základní harmonickou složku vhodně nastaveným filtrem typu dolní propust s dostatečnou strmostí frekvenční amplitudové charakteristiky. Na základě tohoto faktu je ze vstupního signálu 10 kHz a připojením externí kapacity CG9 = 10p získán na výstupu obvodu 7403 sinusový průběh přesně o frekvenci 10 kHz. Obdobně je získán připojením kapacity CG8 a 5 kHz obdélníkového signálu harmonický průběh o kmitočtu 5 kHz. Přepínač JP_EXT_SIG umožňuje zavedení externího signálu do systému, který je přes BNC konektor zapojen na svorky EXT_SIG. V základní poloze přepínače JP_EXT_SIG je do měřicího bloku zaveden jeden z výše popsanych vnitřně generovaných signálů.

¹⁷ parts per milion, jedna miliontina celku

3.4 Měřicí blok

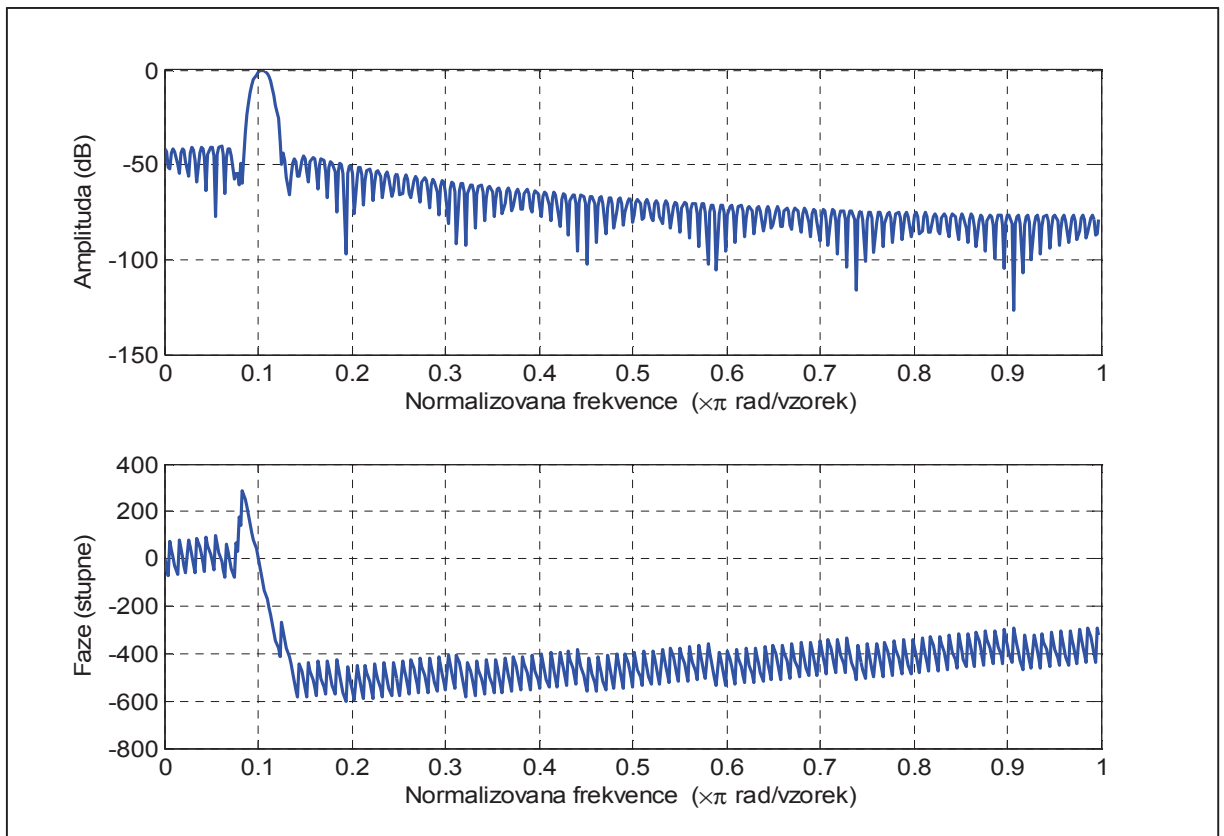
Princip a zapojení tohoto bloku vychází přímo z kapitoly 2.2. Konkrétní schéma elektrického zapojení je v Příloze B na Obr. B3. Konkrétně použitý druh operačního zesilovače je typ TDA2030A. Jde o operační zesilovač, použitelný pro aplikaci v nízkofrekvenčních systémech na principu zesilovače ve třídě AB. Obvod umožňuje vysokou úroveň výstupního proudu. Dle datasheetu je typická hodnota výstupního výkonu do zátěže 4Ω 18 W. Jelikož se velikost modulu vlnové impedance kolejevého vedení na měřicích frekvencích pohybuje okolo hodnoty 10Ω , je nezbytné použít pro řešení měřicího bloku takto výkonově dimenzovaného modelu OZ. Pro eliminaci nestability OZ jsou napájecí vývody osazeny odrušovacími kondenzátory CM2 – CM5 a pro zamezení vysokofrekvenčních oscilací výstupního napětí byl na základě informací z odborné literatury ([3]) výstup zatížen Boucherotovým útlumovým členem, složeným ze sériové kombinace odporu 10Ω a kapacity 68 nF. „Boucherotův člen je běžně zapojován u většiny výkonových integrovaných zesilovačů. Upravuje impedanční poměry výstupu na vysokých frekvencích tak, aby nedocházelo k nežádoucím oscilacím“ [3]. Zkratováním konektoru JP_RET je k zapojení připojen vnitřní etalonový odpor, který je tvořen vysoce přesným rezistorem s přesností 0,5 % o velikosti $5,54 \Omega$. V případě rozpojení JP_RET je možné na svorky RET_OUT připojit libovolnou externí etalonovou zátěž. Pro odstranění stejnosměrné složky ze vstupního signálu je neinvertujícímu vstupu předřazen v sérii oddělovací kondenzátor CM1. Odpor RM3 je paralelní zpětnou vazbou, která přispívá k dalšímu zvýšení stability. Jelikož je velikost tohoto odporu $10 \text{ k}\Omega$, je vliv na měřicí řetězec zanedbatelný, neboť měřená připojená zátěž Z0 je zhruba tisíckrát nižší, a tedy odporem RM3 teče zhruba jen tisícina zpětnovazebního proudu, v kapitole 2.2 označeného jako I_1 . Na svorky SONDY je připojen kabel, který je zakončen konektorem 3,5 mm STEREO JACK, který se připojuje do zvukové karty PC.

3.5 Řešení výpočetního jádra v prostředí MATLAB

Data z měřicího bloku jsou zvukovou kartou navzorkována do audio stereo souboru typu wav. Je využit 24 bitový AD převodník a vzorkovací frekvence 96 kHz. S tímto souborem je dále pracováno v příslušném skriptu prostředí MATLAB.

V Příloze A Tabulka A6 je zdrojový kód výpočetního jádra. Vektor dat příslušejících vstupnímu a výstupnímu napětí je z obou kanálů souborů extrahován pomocí funkce *wavread*

do vektoru dat s názvem data. Pomocí funkce *fir1* je navržen vstupní číslicový filtr FIR¹⁸ typu pásmová propust. Generování impulsní odezvy tohoto filtru je vytvořeno tak, aby byla vždy vytvořena pásmová propust se zlomovými frekvencemi 0,99f a 1,01f. Tedy v případě 5 kHz měřicího signálu 4950 Hz a 5050 Hz a v případě 10 kHz 9900 Hz a 10100 Hz. Jelikož je řád filtru 200 (tedy i počet členů impulsní odezvy), je zajištěna dostatečná strmota amplitudové frekvenční charakteristiky. Na Obr. 3.2 je pomocí funkce *freqz* zobrazena normovaná amplitudová i fázová frekvenční charakteristika navrženého vstupního filtru pro propustnou frekvenci 5 kHz se vzorkováním 96 kHz. Jelikož je v další části skriptu pracováno se spektrem, je použití tohoto filtru redundantní, neboť je možné měřicí kmitočty nalézt přesně v příslušném spektrálním vektoru dat. Vzhledem k značnému rušivému pozadí v kolejovém vedení je však tato redundance na místě.



Obrázek 3.2 Amplitudová a fázová frekvenční normalizovaná charakteristika vstupního filtru

¹⁸ číslicový filtr s konečnou délkou impulsní odezvy

3.5.1 Měření modulu impedance

Takto vyfiltrovaný signál je dále zpracován k určení velikosti modulu měřené impedance. Pro přesné určení hodnoty odpovídající měřicímu kmitočtu je časový průběh pomocí funkce fft^{19} převeden do spektrální oblasti a dále je počítáno s jednotlivými spektrálními složkami signálu. Pro výpočet Fourierovi transformace je vybráno N vzorků rovno f_{vz} , aby bylo frekvenční rozlišení Δf vypočteného spektra právě 1 Hz, neboť platí vztah 3.1. Další výpočet se spektrálními daty příslušných elektrických veličin měřicího bloku je založen na principu, který byl popsán v kapitole 2.2. Vzhledem k tomu, že měřicí sondy neumístujeme na počátek kolejového vedení, ale do libovolné vzdálenosti, je třeba dodržet podmínku, která plyne z úvah v kapitole 2.3.1. Přibližně 300 m na obě strany od bodu měření nesmí být připojeno žádné zařízení, ani nesmí být vedení ukončeno např. izolovaným stykem. Tento dohromady zhruba 600 m dlouhý úsek je oblastí konkrétního měření. Protože se měřicí proud rovnoměrně rozdělí do obou směrů, měříme ve skutečnosti dvě paralelně připojené větve vedení, a tedy i paralelní kombinaci dvou vlnových impedancí. To znamená, že naměřená hodnota odpovídá polovině charakteristické impedance. Velikost svodové admitance se již dopočítá dle teoretických vztahů z kapitoly 1, konkrétně dle rovnice (1.15).

$$\Delta f = \frac{f_{vz}}{N} \quad (3.1)$$

3.5.2 Měření argumentu impedance

Pro určení fázového zpoždění analyzovaných signálů bylo navrženo několik postupů s odlišným principem řešení. Některé jsou aplikovatelné s větší přesností, některé s menší. Pro přehled jsou zde uvedeny dvě zkoumané možnosti.

První metoda hledání fázového zpoždění využívá korelační funkce *crosscorr*, která znázorňuje míru podobnosti dvou i více signálů v závislosti na jejich vzájemném posunutí o určitý počet vzorků. Pokud posuzujeme dva fázově posunuté signály o stejné frekvenci, je možné zjistit s určitou přesností hodnotu tohoto posuvu aplikací korelační funkce postupně o 1 až X vzorků, kde hodnota X odpovídá hodnotě počtu vzorků na periodu. Korelace, respektive vzájemné posunutí signálů, je provedena oběma směry, tak aby bylo možné určit i

¹⁹ rychlá Fourierova transformace

případ, že výstupní napětí operačního zesilovače se fázově zpožďuje za napětím na etalonu, což by signalizovalo kapacitní charakter připojené impedance. Nalezením maxima korelační funkce a příslušného vzorkového posuvu k tomuto maximu určíme hodnotu argumentu dle vztahu 3.2.

$$argument = 360 \cdot \frac{vzorkovy\ posuv}{pocet\ vzorku\ na\ periodu} [^\circ] \quad (3.2)$$

Přesnost této hodnoty je však značně limitována faktem, že je použítou vzorkovací frekvencí a konkrétním měřicím kmitočtem jasně určen počet vzorků na periodu analyzovaného číslicového signálu. Tento počet odpovídá fázovému posuvu o celou periodu, tedy 360° . Z tohoto faktu je patrné, že fázový posuv je možné určit pouze v inkrementech daných vztahem 3.3.

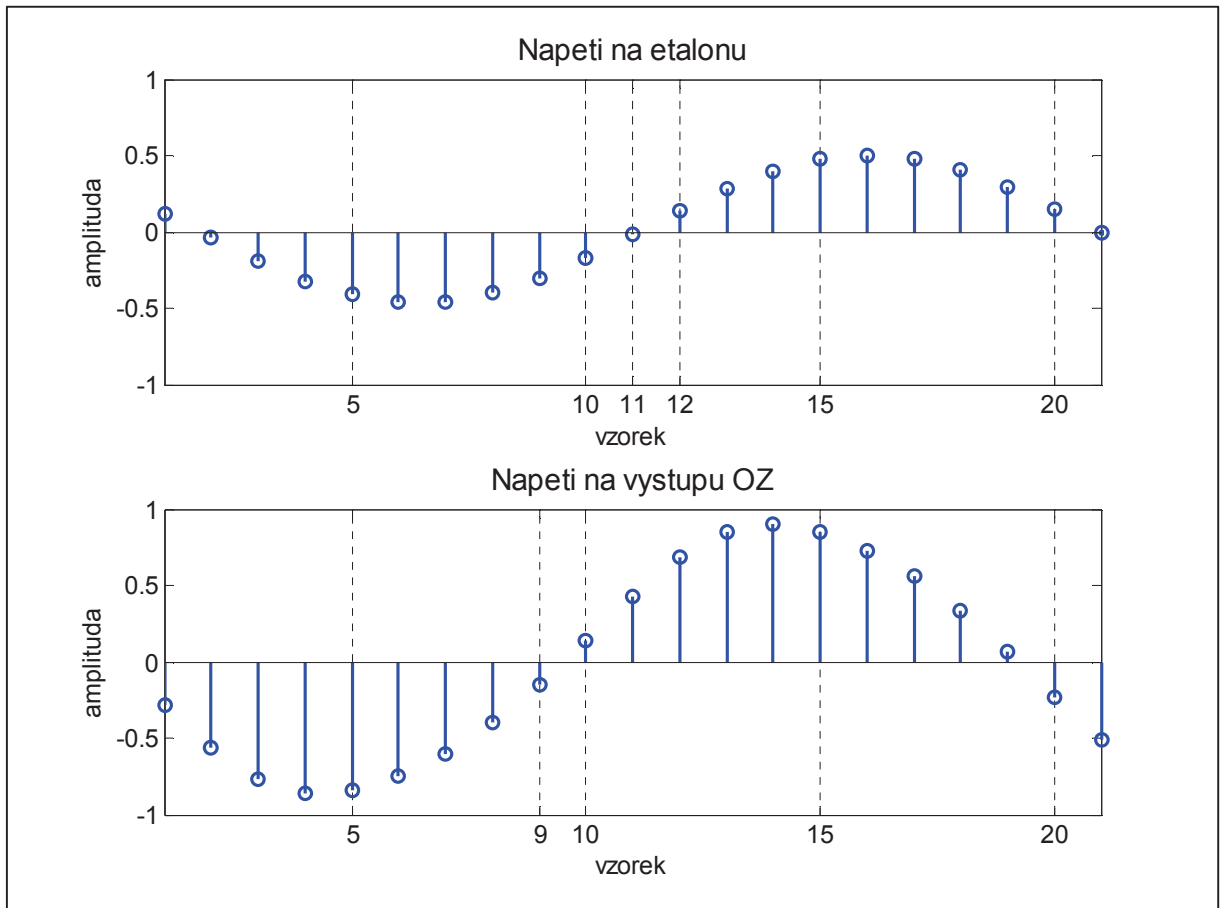
$$\Delta argument = \frac{360}{pocet\ vzorku\ na\ periodu} [^\circ] \quad (3.3)$$

Snížení tohoto inkrementu, resp. zvýšení přesnosti, je možné dosáhnout pouze zvýšením počtu vzorků na jednu periodu signálu, což je možné buď zvýšením vzorkovací frekvence, nebo snížením měřicího vzorkovaného signálu. Tato metoda přináší velice rychlé a výpočetně nenáročné určení fázového zpoždění číslicových signálů, které mají velikou hodnotu vzorků v jedné periodě signálu, resp. veliký odstup vzorkovací frekvence od vzorkované. Jelikož je v popisovaném zařízení použito vzorkovací frekvence 96 kHz, je maximální možná přesnost určení argumentu dána Tabulkou 3.1. Z těchto hodnot plyne, že v našem případě spíše než měření fázového zpoždění je prováděna touto metodou jen indikace. Přínosem alespoň je, že je nám takováto indikace schopna podat informaci, zda má měřená impedance charakter indukční, či kapacitní. Jelikož z podstaty kolejového vedení je charakter svodové admitance kapacitní, odpovídá indikace indukčního charakteru nějaké chybě měření.

Tabulka 3.1

měřicí signál	5 kHz	10 kHz
počet vzorků na periodu	19	9
$\Delta argument [^\circ]$	18,9	40

Jistého zlepšení přesnosti by bylo možné dosáhnout zavedením lineární aproximace, která by vycházela z nalezení přesného průchodu linearizovaného signálu nulovou hodnotou. Z takového postupu je poté možné získat přesnější hodnotu fázového posuvu. Vycházíme z Obr. 3.3, kde první průběh znázorňuje vzorky signálu napětí na etalonu a druhý vzorky signálu napětí na výstupu operačního zesilovače, tedy napětí na etalonu v sérii s měřenou impedancí.



Obrázek 3.3

Z průběhů je patrné, že napětí na výstupu OZ fázově předchází napětí na etalonu. Průchod nulou prvního signálu se nachází mezi vzorky 11 a 12. Proložením přímky hodnotami 11. a 12. vzorku získáme lineárně aproximovanou hodnotu polohy průchodu signálu nulou. Stejný postup aplikujeme i na druhý signál, kde se předpokládaná poloha průchodu signálu osou x nachází někde mezi vzorky 9 a 10. Výpočet pro první signál je v (3.4) a pro druhý v (3.5).

$$\text{hodnota amplitudy vzorku číslo 11} = \text{amp}_{11} = -0,018 \quad (3.4)$$

$$\text{hodnota amplitudy vzorku číslo 12} = \text{amp}_{12} = 0,139$$

$$\frac{d(\text{amp})}{d(\text{vzorku})} = \frac{\text{amp}_{12} - \text{amp}_{11}}{12 - 11} = 0,157$$

$$\text{průchod nulou } x_0 = \frac{|\text{amp}_{11}|}{\frac{d(\text{amp})}{d(\text{vzorku})}} = \frac{0,018}{0,157} = 0,12 \text{ vzorku}$$

$$\text{hodnota amplitudy vzorku číslo 9} = \text{amp}_9 = -0,154 \quad (3.5)$$

$$\text{hodnota amplitudy vzorku číslo 10} = \text{amp}_{10} = 0,134$$

$$\frac{d(\text{amp})}{d(\text{vzorku})} = \frac{\text{amp}_{10} - \text{amp}_9}{10 - 9} = 0,288$$

$$\text{průchod nulou } x_0 = \frac{|\text{amp}_9|}{\frac{d(\text{amp})}{d(\text{vzorku})}} = \frac{0,154}{0,288} = 0,53 \text{ vzorku}$$

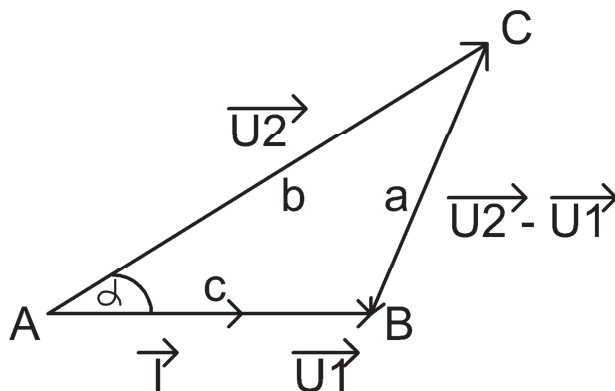
Z výpočtů vychází, že linearizovaný průchod prvního signálu nulou je na pozici 11,12 vzorku a druhého signálu na pozici 9,53 vzorku. Hodnotu fázového zpoždění získáme výpočtem v (3.6).

$$f = 5 \text{ kHz}, f_{vz} = 96 \text{ kHz}, \frac{vz}{per} = \frac{96}{5} = 19,2 \quad (3.6)$$

$$\Delta\varphi[\text{vzorku}] = 11,2 - 9,53 = 1,67 \text{ vzorku}$$

$$\Delta\varphi[^\circ] = 360 * \frac{\Delta\varphi[\text{vzorku}]}{\frac{vz}{per}} = 360 * \frac{1,67}{19,2} = 31,3^\circ$$

Principiálně odlišná metoda vychází z fázorového diagramu naměřených dat na Obr. 3.4. Vektor U_1 je napětí na etalonu, které je ve fázi s proudem, a napětí U_2 je napětí na měřené impedanci v sérii s etalonem, které vzhledem k induktivnímu charakteru měřené impedance fázově proudu předchází.



Obrázek 3.4 Fázorový diagram

Hledané fázové zpoždění je dáno úhlem α . Protože známe velikosti vektorů U_1 a U_2 a tedy i velikost jejich rozdílu, je možné vypočítat úhel α aplikací kosinové věty (vztah 3.7).

$$\alpha = \arccos\left(\frac{a^2 - b^2 - c^2}{-2bc}\right) \quad (3.7)$$

$$a = |\vec{U}_2| - |\vec{U}_1|$$

$$b = |\vec{U}_2|$$

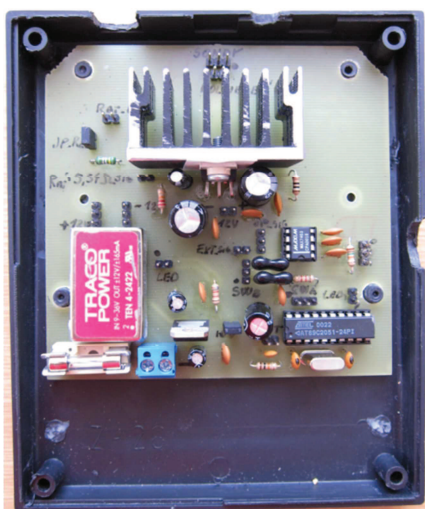
$$c = |\vec{U}_1|$$

Obě popsané metody jsou realizovány ve výpočetním jádře měřicího zařízení. Zdrojový kód je v Příloze A Tabulka A6.

3.6 Návrh DPS a konstrukční provedení zařízení

Návrh desky plošných spojů byl proveden v programu EAGLE. V Příloze B na Obr. B4 je zobrazena vrstva vodivých cest a na Obr. B5 osazovací výkres.

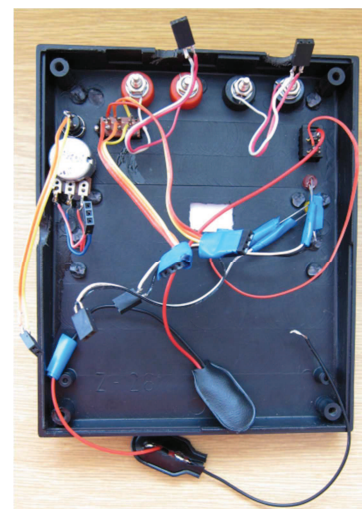
Vyrobená a osazená deska je vložena do spodní části plastové konstrukční krabičky (Obr. 3.3). Horní kryt je osazen ovládacími a indikačními prvky (Obr. 3.4), které jsou dráty připojeny k příslušným konektorům na DPS (Obr. 3.5 a 3.6). Uchytení měřicích kontaktů k hlavě kolejnice je řešeno přitisknutím tenkých měděných drátků speciálním neodymovým magnetem, který působí přitlačnou silou 270 N (Obr. 3.7). Količkovými kontakty je poté měřicí šňůra připojována do červených svorek na horním okraji zařízení.



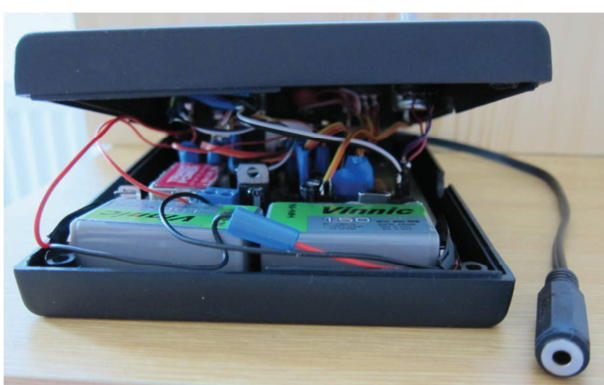
Obrázek 3.5



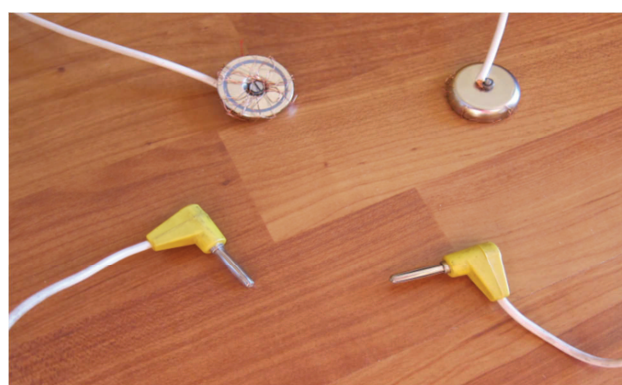
Obrázek 3.6



Obrázek 3.7



Obrázek 3.8



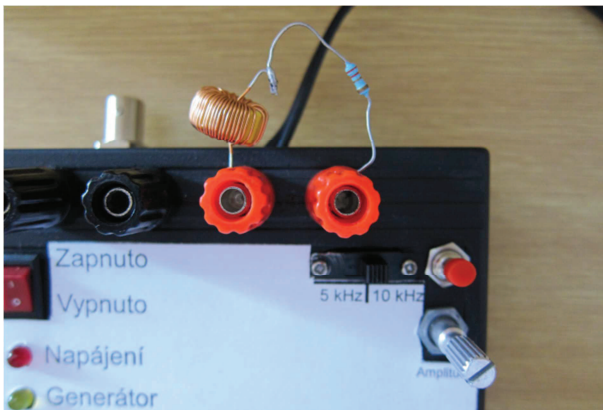
Obrázek 3.9

4 Ověření návrhu zařízení

Pro ověření správné funkčnosti zařízení, definování chyby měření a podmínek používání přístroje bylo nutné před ověřením na konkrétním kolejovém vedení provést měření na známých zátěžích, aby bylo možné ověřit správnost získaných výsledků.

4.1 Měření obecné impedanční zátěže

Jako nejjednodušší možnost ověření je změřit parametry známé impedance. Pro tento účel byla sestavena sériová kombinace rezistoru o velikosti $2,27 \Omega$ a indukčnosti o hodnotě $125 \mu\text{H}$. Zkoušený objekt byl přichycen přímo na měřicí svorky zařízení (Obr. 4.1).



Obrázek 4.1 Připojení měřené impedance

Známa impedance lze tedy pro oba měřicí kmitočty popsat vztahy (4.1) a (4.2).

$$Z_{5\text{kHz}} = 2,27 + j * (2 * \pi * 5000 * 125 * 10^{-6}) = 2,27 + j3,93 = 4,54e^{j59,9^\circ} \quad (4.1)$$

$$Z_{10\text{kHz}} = 2,27 + j * (2 * \pi * 10000 * 125 * 10^{-6}) = 2,27 + j7,86 = 8,18e^{j73,8^\circ} \quad (4.2)$$

Získané signály byly zpracovány skriptem, popsaným v kapitole 3.5, a jako výstupní hodnoty byly posuzovány proměnné $Z0_pul$, $argument_korel$ a $argument_kosin$. Pro každý měřicí kmitočet bylo provedeno 5 nezávislých měření, aby bylo možné objektivně výsledky posoudit a z jejich průměru určit chybu měření. Získané hodnoty jsou v Tabulce 4.1.

Tabulka 4.1

měření	5 kHz			10 kHz		
	modul [Ω]	argument_korel [$^\circ$]	argument_kosin [$^\circ$]	modul [Ω]	argument_korel [$^\circ$]	argument_kosin [$^\circ$]
1	4,54	32,7	37,9	8,2	53,2	40
2	4,55	32,8	37,9	8,47	53,7	40
3	4,32	31,5	37,9	8,16	53,1	40
4	4,05	30,2	37,9	7,65	51,9	40
5	4,56	32,9	37,9	8,58	54,4	40

Po připojení konektoru JACK ke zvukové kartě je postup měření následující:

1. nastavení hlasitosti audio vstupu zvukové karty na minimální hodnotu;
2. nastavení potenciometru do polohy MAX;
3. zmáčknout červené RESET tlačítko generátoru;
4. přepnout tlačítko napájení do polohy zapnuto (indikace červenou diodou);
5. uvolnění tlačítka RESET (indikace běhu generátoru blikající žlutou diodou);
6. postupné zvyšování hlasitosti audio vstupu zvukové karty až do pozice, kdy je silněji buzený kanál již v oblasti maxima AD převodníku karty;
7. lehké snížení amplitudy potenciometrem zařízení, aby byl silněji buzený kanál nastaven na maximální možnou hodnotu, kdy ještě nedochází k přebuzení převodníku;
8. nahrání zhruba pětivteřinového wav souboru.

Výše popsany postup nebyl dodržen v případě měření číslo 4. Potenciometr byl nastaven zhruba v polovině svého rozsahu a maximálního vybuzení AD převodníku karty bylo dosaženo větším zesílením hlasitosti audio vstupu. Je patrné, že takový postup vede ke zhoršení chyby měření. Z hodnot zbylých čtyř měření je aritmetickým průměrem vypočtena průměrná velikost modulu měřené impedance a dopočítány jak chyby jednotlivých měření, tak i chyba průměrné hodnoty definovaná ve smyslu relativní chyby měření dle vztahu (4.3). Výsledky jsou v Tabulce 4.2. Velikost chyby měření argumentu nemá ani smysl určovat, neboť naměřené hodnoty se i v případě metody kosinové věty naprosto odlišují. Obě metody indikují zhruba podobné hodnoty, nicméně značně se od skutečnosti liší. Zdroj této velké nepřesnosti nebyl zjištěn. Je alespoň možné brát získané hodnoty jako indikaci, zda je zátěž induktivního, či kapacitního charakteru, neboť smysl fázového rozdílu zpracovávaných signálů popisují správně.

$$\text{chyba} = \frac{|z_x| - |z|}{|z|} \cdot 100 [\%] \quad (4.3)$$

, kde $|z_x|$ je změřená velikost modulu

, kde $|z|$ je skutečná velikost modulu

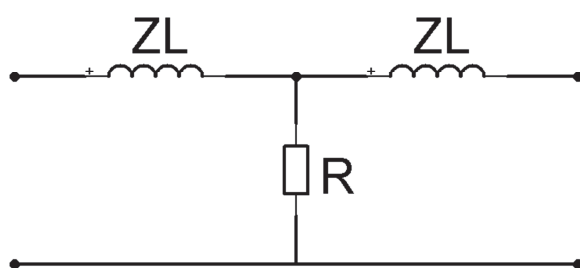
Tabulka 4.2 Chyby jednotlivých měření

měření	5 kHz		10 kHz	
	modul [Ω]	chyba [%]	modul [Ω]	chyba [%]
1	4,54	0,000	8,2	0,244
2	4,55	0,220	8,47	3,545
3	4,32	-4,846	8,16	-0,244
4	4,05	-10,793	7,65	-6,479
5	4,56	0,441	8,58	4,890
průměr	4,49	-1,101	8,35	2,078

Z vypočtených hodnot je patrné, že v případě dodržení výše uvedeného postupu obsluhy měřicího zařízení je možné dosáhnout velice přesného měření modulu impedance s chybou maximálně ± 5 %. Zdroj chyby měření argumentu se nepodařilo definovat. Během měření byl místo tavné pojistky zapojen ampérmetr. Velikost odebíraného proudu z akumulátoru se při měření pohybovala okolo 120 mA a svorkové napětí na člancích bylo 16 V. Příkon zařízení je v energeticky nejnáročnější fázi, tedy při vlastním měření, 1,92 W.

4.2 Měření modelu kolejového vedení

Jako další prvek pro ověření funkčnosti navrženého zařízení byl vybrán model kolejového vedení, který slouží pro simulaci kolejových obvodů se signálním kmitočtem 50 Hz. Model je sestaven tak, že dokáže simulovat až 2 km dlouhé kolejové vedení reprezentované T články, které odpovídají vždy 200m dlouhému úseku. Struktura článku je na Obr. 4.2. V libovolném místě vedení je možné připojit bočník, kterým je možné simulovat buď šunt kolejnicových pasů, nebo připojení měřicích kontaktů navrženého zařízení.



$$R = 5 \text{ Ohm}$$

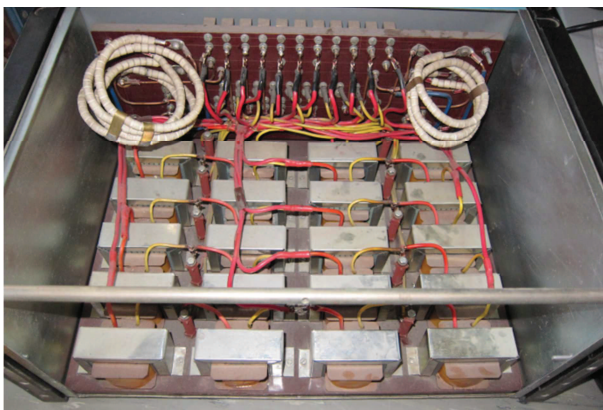
$$|ZL(5\text{kHz})| = 5,4 \text{ Ohm}$$

$$|ZL(10 \text{ kHz})| = 14,3 \text{ Ohm}$$

Obrázek 4.2 T - článek modelu

Protože je model navržen pro signální kmitočet 50 Hz, bylo nutné zjistit, jaké parametry má základní článek modelu pro měřicí kmitočty 5 a 10 kHz. Bylo zjištěno, že jednotlivé indukčnosti mají značně nelineární, frekvenčně závislou, velikost impedance. Proto bylo pro potřeby měření zařízení rozebráno a jeden z článků proměřen pomocí napěťové a proudové sondy osciloskopu, a tak určeny velikosti modulů indukčností pro jednotlivé kmitočty, viz Obr. 4.2. Vnitřní uspořádání jednotlivých prvků modelu je na Obr. 4.3.

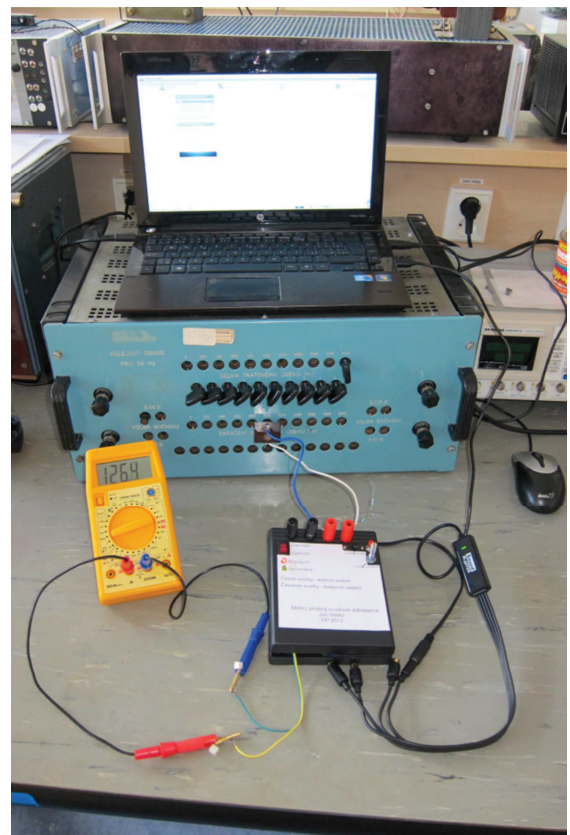
Pro konkrétní měření byla zvolena délka vedení 2 km s nastavenou měrnou svodovou admitancí 1 S/km a do polohy 1 km byl vložen bočník, přes který se vyvedly kontakty na svorky měřicího funkčního vzorku (Obr. 4.4). Celá měřicí sestava je na Obr. 4.5.



Obrázek 4.3 Vnitřní uspořádání modelu



Obrázek 4.4 Ovládací prvky modelu



Obrázek 4.5 Měřicí sestava

Modul měrné podélné impedance takto zvoleného vedení odpovídá pěti článkům, z nichž každý obsahuje v podélné větvi indukčnost o příslušné velikosti modulu (4.4).

$$|z(5 \text{ kHz})| = 5 * 2 * 5,4 = 54 \Omega/km \quad (4.4)$$

$$|z(10 \text{ kHz})| = 5 * 2 * 14,3 = 143 \Omega/km$$

Výpočet argumentu nebyl prováděn, neboť není možné jasně určit argument měrné podélné impedance modelu. Pro každý měřicí kmitočet byla provedena dvě měření a výsledné hodnoty měrné svodové admitance, které byly spočteny na základě znalosti hodnot v (4.4), zaneseny do Tabulky 4.3.

Tabulka 4.3 Naměřené hodnoty měrné svodové admitance

měření	5 kHz	10 kHz
	měrná svodová admitance [S/km]	měrná svodová admitance [S/km]
1	0,98	0,99
2	1,03	1,04

Protože byla nahrazena tabulková měrná podélná impedance skutečnými hodnotami pro tento konkrétní model, odpovídají získané hodnoty jeho nastavení.

4.3 Měření na reálném kolejovém vedení

Ověření zařízení na reálném kolejovém vedení bylo umožněno provést 7. května 2012 na trati v okolí stanice Stod za dohledu pověřeného pracovníka SŽDC²⁰. Nejprve bylo provedeno měření na hlavní staniční koleji (Obr. 4.6), kde se očekávala nízká hodnota měrné svodové admitance, neboť byla tato kolej pravidelně udržována. Další měření se provedlo na vedlejší koleji, staniční označení 3 (Obr. 4.7), která byla vzhledem k částečnému zanešení železničního svršku zeminou z hlediska izolačního stavu problematická. Tento fakt potvrdil i dohlížející pracovník. V případě velké vlhkosti svršku po dlouhotrvajících deštích dochází kvůli špatnému izolačnímu stavu i k výpadkům funkce kolejového obvodu, který je na této koleji nasazen. Po očištění hlav kolejnic smirkovým papírem od lehké koroze byly uchyceny měřicí sondy a zapojena celá měřicí sestava (Obr. 4.8 a 4.9).

Při prvním pokusném měření nastal problém se signálním kmitočtem kolejového obvodu. Jelikož je maximální hodnota napětí měřicího signálu někde nad 1 V, nastal problém s přebuzením AD převodníku zvukové karty signálním kmitočtem KO, který v bodě měření dosahoval hodnoty cca 3 V. Toto bylo také potvrzeno příslušnými regulačními tabulkami. Již v počátku ověření byla tedy odhalena podstatná chyba návrhu. Dostatečná frekvenční selektivita je sice zajištěna konkrétním algoritmem číslicového zpracování dat, je však do

²⁰ Správa železniční a dopravní cesty

budoucná ještě nutné zajistit, aby hodnota amplitudy měřicího signálu dosahovala takové úrovně, kdy nebude docházet k přebuzení vstupního AD převodníku signálem kolejového obvodu, čímž je znemožněno navzorkování užitečných měřicích dat.



Obrázek 4.6 Staniční kolej číslo 1



Obrázek 4.7 Staniční kolej číslo 3



Obrázek 4.8 Zapojení měřicí sestavy na koleji 1



Obrázek 4.9 Zapojení měřicí sestavy na koleji 3

Pro další měření bylo tedy nutné vypnout příslušný kolejový obvod. V Tabulce 4.4 jsou hodnoty změřených svodových admitancí pro jednotlivé měřicí kmitočty a měřené koleje. Hodnoty, odpovídající měřicímu kmitočtu 5 kHz, jsou velice nepřesné. Problém je v délce měřeného izolovaného úseku. Na jednom konci se ve vzdálenosti cca 150 m již nacházel konec kolejového obvodu s připojeným stykovým transformátorem a druhý konec vedení byl zhruba ve vzdálenosti 200 m. Na základě teoretického rozboru není takováto vzdálenost pro kmitočet 5 kHz dostatečná, aby bylo možné zanedbat připojenou výstroj KO. Výsledky, získané použitím měřicí frekvence 10 kHz již odpovídají předpokladu. Běžné hodnoty udržovaného železničního svršku se pohybují okolo 0,4 S/km. Je také vidět, že skutečně hodnota měrné svodové admitance třetí staniční koleje překračuje povolenou mez. Je možné usuzovat, že v případě velké vlhkosti železničního svršku této koleje dosahuje ještě vyšších hodnot, které již vylučují správnou funkčnost nainstalovaného kolejového obvodu.

Tabulka 4.4

staniční kolej	5 kHz	10 kHz
	měrná svodová admitance [S/km]	měrná svodová admitance [S/km]
1	3,27	0,34
2	5,88	0,87

Pro ověření funkce i na kmitočtu 5 kHz byl vybrán traťový úsek mezi stanicemi Chotěšov u Stoda a Zbůch, kde se nachází kolejový obvod délky cca 700 m, což je v případě měření uprostřed tohoto úseku dostatečné. Situace v místě měření je na Obr. 4.10 a 4.11.



Obrázek 4.10



Obrázek 4.11

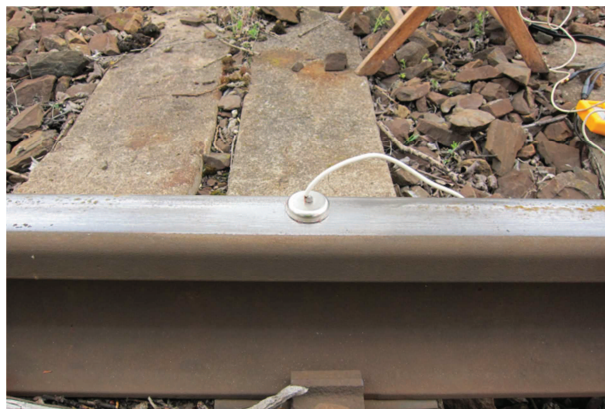
Z výše popsaného důvodu byl vypnut kolejový obvod na měřené koleji a zapojena měřicí sestava (Obr. 4.12 – 4.15). Z výsledků v Tabulce 4.5 je patrné, že již v tomto úseku výsledky získané oběma měřicími frekvencemi spolu korespondují. Jelikož se jedná o pravidelně pojižděnou a udržovanou kolej, je opět pravděpodobné, že naměřené hodnoty skutečně odpovídají realitě.

Tabulka 4.5

5 kHz	10 kHz
měrná svodová admitance [S/km]	měrná svodová admitance [S/km]
0,37	0,32



Obrázek 4.12



Obrázek 4.13



Obrázek 4.14



Obrázek 4.15

Jelikož v době měření nebylo na spádovém pracovišti k dispozici zařízení ISB1, není možné změřené hodnoty s ničím objektivně posoudit. Do konce května 2012 by však mělo měření tímto přístrojem proběhnout a získané výsledky budou k porovnání poskytnuty. Problém ovšem je, že velikost měrné svodové admitance je poměrně značně závislá na konkrétních podmínkách měření, a to především z hlediska vlhkosti a teploty železničního svršku. Poskytnutá data tak bude možné se získanými hodnotami porovnat jen s jistou mírou přesnosti. Přesto je možné naměřené hodnoty prohlásit s velkou pravděpodobností za realitě odpovídající, neboť z dlouhodobých zkušeností udržujících pracovníků se reálné hodnoty měřených úseků skutečně shodují s naměřenými.

Závěr

V práci je jasně nadefinováno prostředí, pro které je měřicí metoda, respektive měřicí přístroj, určen. Byly uvedeny příslušné teoretické rozbory především z hlediska teorie vedení, o které se návrh celého měřicího systému opírá. Konstrukce samotného zařízení vychází ze standartních zapojení, která byla pouze modifikována pro konkrétní aplikaci. Během návrhu aktivní měřicí části nastal značný problém se zajištěním stability operačního zesilovače, který je jádrem měřicího bloku zařízení. Na základě informací z příslušné literatury a především praktických zkušeností vedoucího práce byla postupně operační síť vybavena dodatečnými prvky zpětných vazeb, které zajišťují dostatečnou míru stability pro jakékoliv zkušební podmínky. Přestože se nepodařilo nalézt příčinu velké nepřesnosti měření argumentu posuzované impedance, dosahuje zařízení v měření modulu vysoké přesnosti, což bylo potvrzeno nejen na obecné zátěži, či modelu vedení, ale také na skutečné železniční infrastruktuře.

Hlavní význam práce je v jasném nadefinování podmínek na měřeném úseku kolejového vedení v závislosti na jeho zatížení a na měřicím kmitočtu. Na základě těchto závěrů je nadefinována obecně platná měřicí metoda, která může být fyzicky realizovaná různými technologiemi. Zkonstruovaný funkční vzorek potvrdil její správnost a představuje jednu z možností jak navrženou metodu aplikovat. Konstrukce zařízení na principu virtuálního měřicího přístroje přináší velkou výhodu v offline zpracování dat. Tento přístup přináší možnost rychlé úpravy zdrojového kódu výpočetního jádra a okamžité aplikace nové verze na uložená data z měření. Nevýhodou tohoto řešení je značná nekomfortnost především z důvodu potřeby přenosného osobního počítače, který je k aktivní měřicí části připojen a slouží jako výpočetní hardware zpracování dat.

Budoucí návrh skutečně použitelného sériově vyráběného přenosného zařízení, kterým by mohla být vybavena každá drážní četa údržby, vyžaduje integraci veškerých částí do jednoho příručního zařízení. Je jasné, že takovéto zařízení bude postaveno na platformě nějakého jednočipového mikrokontroléru, který bude schopen výpočetně s příslušným softwarem nahradit současnou aplikaci v osobním počítači.

Použitá literatura

- [1] V. Chudáček, Vl. Kyjovský, L. Lochman : *Detekce kolejových vozidel, ČD – VÚŽ*, Praha 1997
- [2] Ing. Bohumil Nádvorník a kolektiv : *Měřicí přístroje a měření v zabezpečovací technice*, Nakladatelství dopravy a spojů, Praha 1975
- [3] Josef Punčochář : *Operační zesilovače v elektronice*, 5. vydání, Ben – technická literatura, Praha 2002
- [4] Vladimír Haasz, Miloš Sedláček : *Elektrická měření, Přístroje a metody*, Vydavatelství ČVUT, Praha 1998
- [5] Jiří Pinker, Václav Koucký : *Analogové elektronické systémy 1. část*, Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň 2010
- [6] Ing. Leoš Koupý : *Jaké známe chyby měření*. [30. dubna 2012], dostupné z <http://elektrika.cz/data/clanky/chyby-mereni>
- [7] ČSN 34 2613 : *Železniční zabezpečovací zařízení – Kolejové obvody a vnější podmínky pro jejich činnost*, CNI Prosinec 2007
- [8] Karel Zaplatílek : *MATLAB : Začínáme se signály*, BEN – technická literatura, Praha 2006
- [9] Bantel, Martin. *Grundlagen der Messtechnik: Messunsicherheit von Messung und Messgerät*, Fachbuchverlag, Leipzig 2000
- [10] S. Tumanski : *Principles of electrical measurement*, CRC Press, Warsaw 2006

Přílohy

Příloha A – Zdrojové kódy použitých programovacích jazyků

Tabulka A1 Příslušný kód v prostředí MATLAB

```

clear;
z = 1.3746 + j*9.1978; %9.3/81.5°
y = 0.67;
xohm(1) = 0.5;%zatez na konci vedeni
xohm(2) = 1;
xohm(3) = 2;
xohm(4) = 3;
xohm(5) = 5;
Z0 = sqrt(z/y);
gama = sqrt(z*y);
i = 1;
for L = (0:0.01:2)

Z1kratko = Z0*sinh(gama*L) / cosh(gama*L);
Z1prazdno = Z0*cosh(gama*L) / sinh(gama*L);

Z1xohm1 = ((cosh(gama*L)+(Z0*sinh(gama*L))/xohm(1)) / ((sinh(gama*L))/Z0
+ (cosh(gama*L))/xohm(1)));
Z1xohm2 = ((cosh(gama*L)+(Z0*sinh(gama*L))/xohm(2)) / ((sinh(gama*L))/Z0
+ (cosh(gama*L))/xohm(2)));
Z1xohm3 = ((cosh(gama*L)+(Z0*sinh(gama*L))/xohm(3)) / ((sinh(gama*L))/Z0
+ (cosh(gama*L))/xohm(3)));
Z1xohm4 = ((cosh(gama*L)+(Z0*sinh(gama*L))/xohm(4)) / ((sinh(gama*L))/Z0
+ (cosh(gama*L))/xohm(4)));
Z1xohm5 = ((cosh(gama*L)+(Z0*sinh(gama*L))/xohm(5)) / ((sinh(gama*L))/Z0
+ (cosh(gama*L))/xohm(5)));

modul_Z0(i) = abs(Z0);
modul_Z1kratko(i) = abs(Z1kratko);
modul_Z1prazdno(i) = abs(Z1prazdno);
modul_Z1xohm1(i) = abs(Z1xohm1);
modul_Z1xohm2(i) = abs(Z1xohm2);
modul_Z1xohm3(i) = abs(Z1xohm3);
modul_Z1xohm4(i) = abs(Z1xohm4);
modul_Z1xohm5(i) = abs(Z1xohm5);
osa(i) = L;
i = i + 1;
end

figure(1)
plot(osa,modul_Z0, 'r')
hold on
plot(osa,modul_Z1xohm1, 'b', 'LineWidth',2)
plot(osa,modul_Z1xohm2, 'g', 'LineWidth',2)
plot(osa,modul_Z1xohm3, 'c', 'LineWidth',2)
plot(osa,modul_Z1xohm4, 'm', 'LineWidth',2)
plot(osa,modul_Z1xohm5, 'y', 'LineWidth',2)
plot(osa,modul_Z1kratko, 'k', 'LineWidth',2)
plot(osa,modul_Z1prazdno, 'k--', 'LineWidth',2)
axis([0 2 0 7]);
xlabel('vzdalenost [km]');
ylabel('modul impedance [Ohm]');
legend1 = legend({'|Z0|', '|Z_1| pro Z_2 = 0.5ohm', '|Z_1| pro Z_2 =
1ohm', '|Z_1| pro Z_2 = 2ohm', '|Z_1| pro Z_2 = 3ohm', '|Z_1| pro Z_2 =
5ohm', '|Z 1 kratko|', '|Z 1 prazdno|'});

```

Tabulka A2 Příslušný kód v prostředí MATLAB

```
clear;

z_275 = 0.5849 + j*2.5334; %2.6/77°
z_1000 = 1.3746 + j*9.1978; %9.3/81.5°
y = 0.67;

Z0_275 = sqrt(z_275/y);
gama_275 = sqrt(z_275*y);
Z0_1000 = sqrt(z_1000/y);
gama_1000 = sqrt(z_1000*y);

i = 1;
for L = (0:0.01:2)

Z1kratko_275 = Z0_275*sinh(gama_275*L) / cosh(gama_275*L);
Z1kratko_1000 = Z0_1000*sinh(gama_1000*L) / cosh(gama_1000*L);

modul_Z1kratko_275(i) = abs(Z1kratko_275);
modul_Z1kratko_1000(i) = abs(Z1kratko_1000);
modul_Z0_275(i) = abs(Z0_275);
modul_Z0_1000(i) = abs(Z0_1000);
osa(i) = L;
i = i + 1;
end

figure(1)
plot(osa,modul_Z0_275, 'r','LineWidth',2)
hold on
plot(osa,modul_Z1kratko_275,'LineWidth',2)
xlabel('vzdalenost [km]');
ylabel('modul impedance [Ohm]');
legend1 = legend({'|Z0|','|Z1k|'});

figure(2)
plot(osa,modul_Z0_1000, 'r','LineWidth',2)
hold on
plot(osa,modul_Z1kratko_1000,'LineWidth',2)
xlabel('vzdalenost [km]');
ylabel('modul impedance [Ohm]');
legend1 = legend({'|Z0|','|Z1k|'});
```

Tabulka A3 Příslušný kód v prostředí MATLAB

```

clear;
z_1000 = 1.3746 + j*9.1978; %9.3/81.5°
z_2500 = 2.4905 + j*21.8586; %22/83.5°
z_5000 = 3.7477 + j*42.8364; %43/85°
z_10000 = 7.4082+ j*84.6765; %85/85°
z_20000 = 11.7191 + j*167.5908; %168/86°
z_30000 = 17.2298 + j*246.3983; %247/86°

y = 0.67;

Z0_1000 = sqrt(z_1000/y);
gama_1000 = sqrt(z_1000*y);
Z0_2500 = sqrt(z_2500/y);
gama_2500 = sqrt(z_2500*y);
Z0_5000 = sqrt(z_5000/y);
gama_5000 = sqrt(z_5000*y);
Z0_10000 = sqrt(z_10000/y);
gama_10000 = sqrt(z_10000*y);
Z0_20000 = sqrt(z_20000/y);
gama_20000 = sqrt(z_20000*y);
Z0_30000 = sqrt(z_30000/y);
gama_30000 = sqrt(z_30000*y);

Z0 = [abs(Z0_1000), abs(Z0_2500), abs(Z0_5000), abs(Z0_10000),
abs(Z0_20000), abs(Z0_30000)];

i = 1;
for L = (0:0.001:2)

Zlkratko_1000 = Z0_1000*sinh(gama_1000*L) / cosh(gama_1000*L);
Zlkratko_2500 = Z0_2500*sinh(gama_2500*L) / cosh(gama_2500*L);
Zlkratko_5000 = Z0_5000*sinh(gama_5000*L) / cosh(gama_5000*L);
Zlkratko_10000 = Z0_10000*sinh(gama_10000*L) / cosh(gama_10000*L);
Zlkratko_20000 = Z0_20000*sinh(gama_20000*L) / cosh(gama_20000*L);
Zlkratko_30000 = Z0_30000*sinh(gama_30000*L) / cosh(gama_30000*L);

modul_Zlkratko(1,i) = abs(Zlkratko_1000);
modul_Zlkratko(2,i) = abs(Zlkratko_2500);
modul_Zlkratko(3,i) = abs(Zlkratko_5000);
modul_Zlkratko(4,i) = abs(Zlkratko_10000);
modul_Zlkratko(5,i) = abs(Zlkratko_20000);
modul_Zlkratko(6,i) = abs(Zlkratko_30000);

modul_Z0(1,i) = abs(Z0_1000);
modul_Z0(2,i) = abs(Z0_2500);
modul_Z0(3,i) = abs(Z0_5000);
modul_Z0(4,i) = abs(Z0_10000);
modul_Z0(5,i) = abs(Z0_20000);
modul_Z0(6,i) = abs(Z0_30000);
osa(i) = L;
i = i + 1;
end
chyba = 100*(abs(modul_Zlkratko - modul_Z0)) ./ modul_Z0;

```

Pokračování Tabulky A3

```
figure(1)
plot(osa, modul_Z1kratko(1, :), 'LineWidth', 2)
hold on
plot(osa, modul_Z0(1, :), 'r', 'LineWidth', 2)
title('Vedení buzeno harmonickým signalem o kmitočtu 1kHz')
xlabel('vzdálenost zkratu kolejového vedení od bodu měření [km]');
ylabel('velikost modulu impedance [Ohm]');
legend1 = legend({'|Z_1| nakratko', '|Z_0|'});

figure(2)
plot(osa, modul_Z1kratko(6, :), 'LineWidth', 2)
hold on
plot(osa, modul_Z0(6, :), 'r', 'LineWidth', 2)
title('Vedení buzeno harmonickým signalem o kmitočtu 30kHz')
xlabel('vzdálenost zkratu kolejového vedení od bodu měření [km]');
ylabel('velikost modulu impedance [Ohm]');
legend1 = legend({'|Z_1| nakratko', '|Z_0|'});

figure(3)
plot(osa, chyba(1, :), 'k', 'LineWidth', 2);
hold on
plot(osa, chyba(6, :), 'r', 'LineWidth', 2);
grid on
xlabel('vzdálenost zkratu kolejového vedení od bodu měření [km]');
ylabel('chyba [%]');
legend1 = legend({'1 kHz', '30 kHz'});

figure(4)
plot(osa, chyba, 'LineWidth', 2);
grid on
xlabel('vzdálenost zkratu kolejového vedení od bodu měření [km]');
ylabel('chyba [%]');
legend1 = legend({'1 kHz', '2,5 kHz', '5 kHz', '10 kHz', '20 kHz', '30 kHz'});
```

Tabulka A4 Příslušný kód v prostředí MATLAB

```
fvz = 44100;
data1 = RC_DC'; % import dat ze souboru .mat
data2 = RC_AC'; % import dat ze souboru .mat

N1 = length(data1);
N2 = length(data2);

t_osa1 = (0 : 1/fvz : (N1-1)/fvz);
f_osa1 = (0 : fvz/N1 : 0.5*fvz-(fvz/N1));

t_osa2 = (0 : 1/fvz : (N2-1)/fvz);
f_osa2 = (0 : fvz/N2 : 0.5*fvz-(fvz/N2));

spektrum1 = fft(data1);
spektrum2 = fft(data2);

amp_spektrum1 = abs(spektrum1(1:N1/2));
amp_spektrum2 = abs(spektrum2(1:N2/2));

maximum1 = max(amp_spektrum1);
log_amp_spektrum1 = 20*log10(amp_spektrum1./maximum1);

maximum2 = max(amp_spektrum2);
log_amp_spektrum2 = 20*log10(amp_spektrum2./maximum2);

figure(1)
subplot(2,1,1)
plot(t_osa1,data1); grid on
title('Casovy prubeh');
xlabel('cas [s]');
ylabel('amplituda [A]');

subplot(2,1,2)
plot(f_osa1,log_amp_spektrum1); grid on
title('Spektrum - amplitudova charakteristika');
xlabel('frekvence [kHz]');
ylabel('odstup od max hodnoty [dB]');

figure(2)
subplot(2,1,1)
plot(t_osa2,data2); grid on
title('Casovy prubeh');
xlabel('cas [s]');
ylabel('amplituda [A]');

subplot(2,1,2)
plot(f_osa2,log_amp_spektrum2); grid on
title('Spektrum - amplitudova charakteristika');
xlabel('frekvence [kHz]');
ylabel('odstup od max hodnoty [dB]');
```

Tabulka A5 Příslušný kód v jazyce C

```
#include <reg51.h>

void preruseni (void) interrupt 1 { // rutina preruseni citace 0 provadena
    // kazdych 100 us

    static char x = 0;
    static int i = 0;
    i++;
    x++;
    if (i == 2000){
        P3 = P3 ^ 0x80; // zmena brany signalizacni diody
                        // (blikani kazdych 200 ms)

        i = 0;
    }

    P1 = P1 ^ 0x80; // generovani obdelniku s periodou
                  // 100 us (10 kHz) na brane P1.7

    if (x == 2){ // generovani obdelniku s periodou
                 // 200 us (5 kHz) na brane P1.6

        P1 = P1 ^ 0x40;
        x = 0;
    }
}

void main(void){
    TMOD = 0x02; //nastaveni registru citace 0
    TH0 = 256 - 50;
    TR0 = 1;
    ET0 = 1;
    EA = 1;

    while(1){
    }

}
```

Tabulka A6 Příslušný kód v prostředí MATLAB

```

clear;
f = 5000; %zvoleni mericiho kmitoctu
z = 3.7477 + j*42.8364; %43/85° z pro 5kHz
%z = 7.4082+ j*84.6765; %85/85° z pro 10kHz
[data,fvz]=wavread('5k_1.wav'); %nahrani dat z audio wav souboru
vzorku_na_periodu = floor(fvz/f); %zaokrouhloeno na cele cislo smerem dolu
U1 = (data(:,1)');
U2 = (data(:,2)');

Wn = [(0.99*f)/(fvz/2), (1.01*f)/(fvz/2)];
h = fir1(200,Wn,'bandpass'); %generovani prvku imp. odezvy
                                %vstupniho FIR filtru
                                %filtrace vstupnich signalu
U1f = filter(h,1,U1);
U2f = filter(h,1,U2);
Udelta = (U2f - U1f);
%-----MERENI AMPLITUDY-----
N = fvz; %zvoleni frekvencniho rozliseni FFT,
                                %aby byl fr krok 1Hz

U1_amp_spektrum = abs(fft(U1(1:N))); %aplikace FFT
U2_amp_spektrum = abs(fft(U2(1:N)));
Udelta_amp_spektrum = abs(fft(Udelta(1:N)));
f_osa = (0:fvz/N:(fvz - fvz/N));

etalon = 5.54;

proud_spektrum = U1_amp_spektrum(f+1) ./ etalon;
Z0_pul = (U2_amp_spektrum(f+1) - U1_amp_spektrum(f+1)) ./ proud_spektrum

y = abs(z)/((2*Z0_pul)^2)
%-----MERENI ARGUMENTU metoda s korelacni funkci-----
[XCF,lag]=crosscorr(U2,U1,vzorku_na_periodu);
pozice_maxima = find(XCF == max(XCF));
posun_vzorku = lag(pozice_maxima);

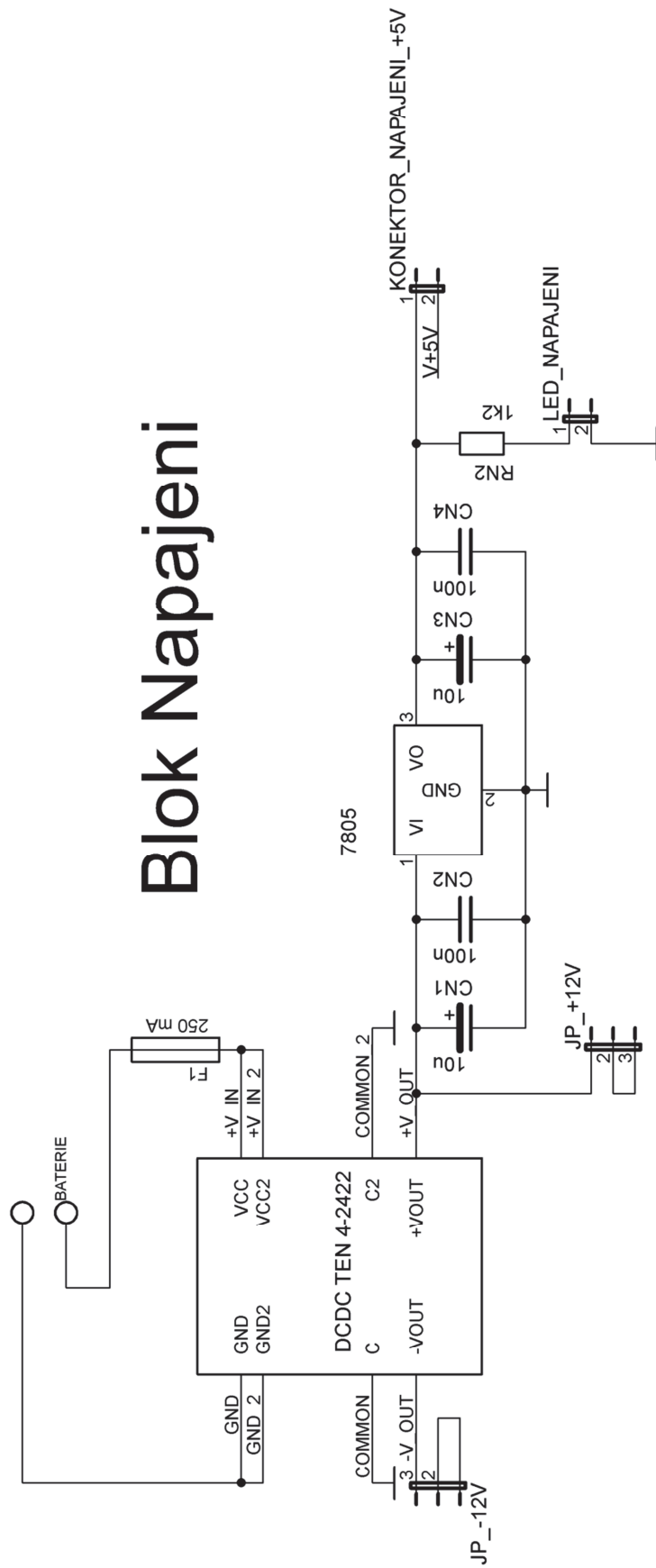
argument_korel = 360*posun_vzorku/vzorku_na_periodu

%-----MERENI ARGUMENTU metoda kosinovou vetou-----
a = Udelta_amp_spektrum(f+1);
b = U2_amp_spektrum(f+1);
c = U1_amp_spektrum(f+1);

argument_rad = acos((a^2 - b^2 - c^2) / (-2*b*c));
argument_kosin = 180*argument_rad/pi

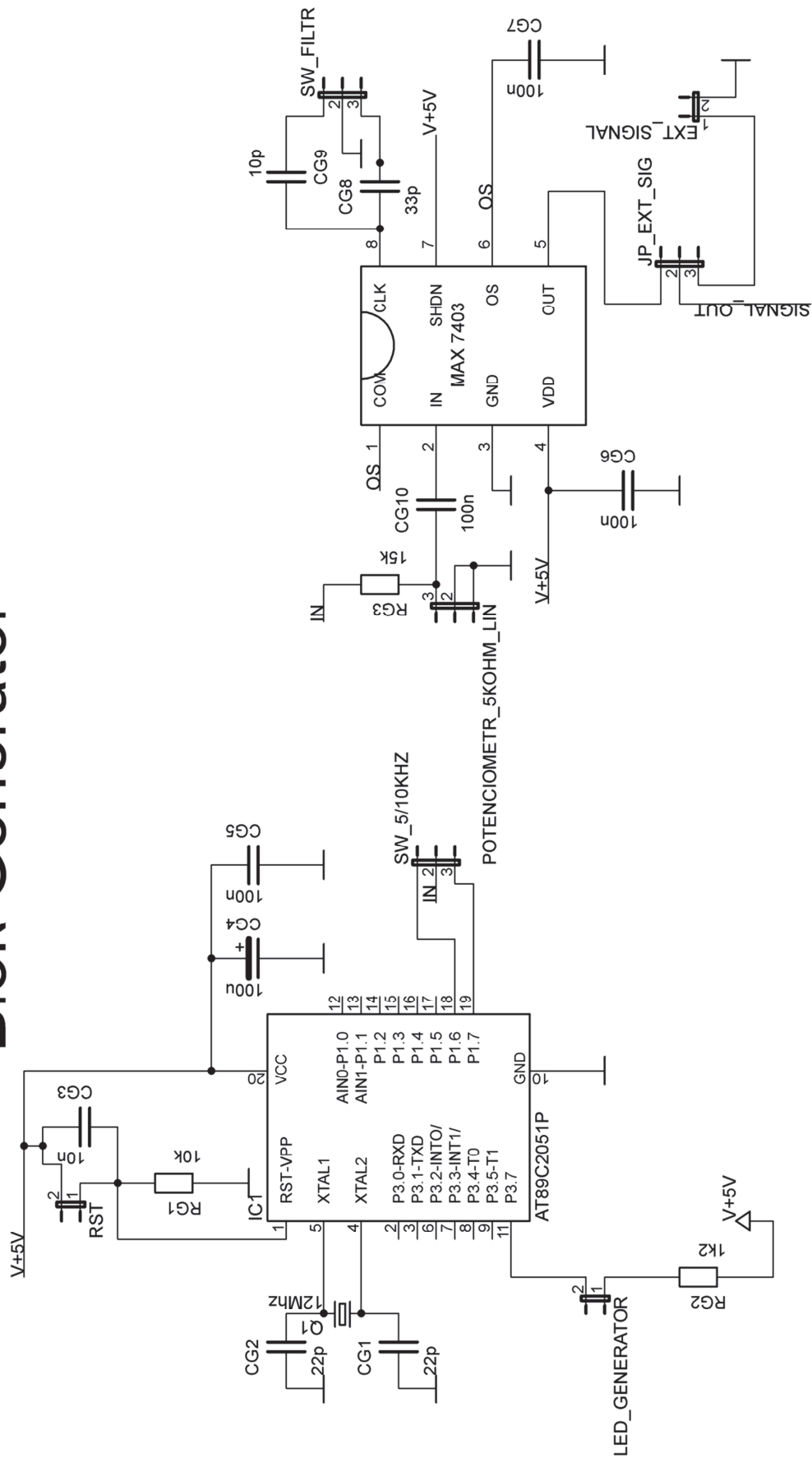
```

Příloha B – Elektrická schémata a obrázky

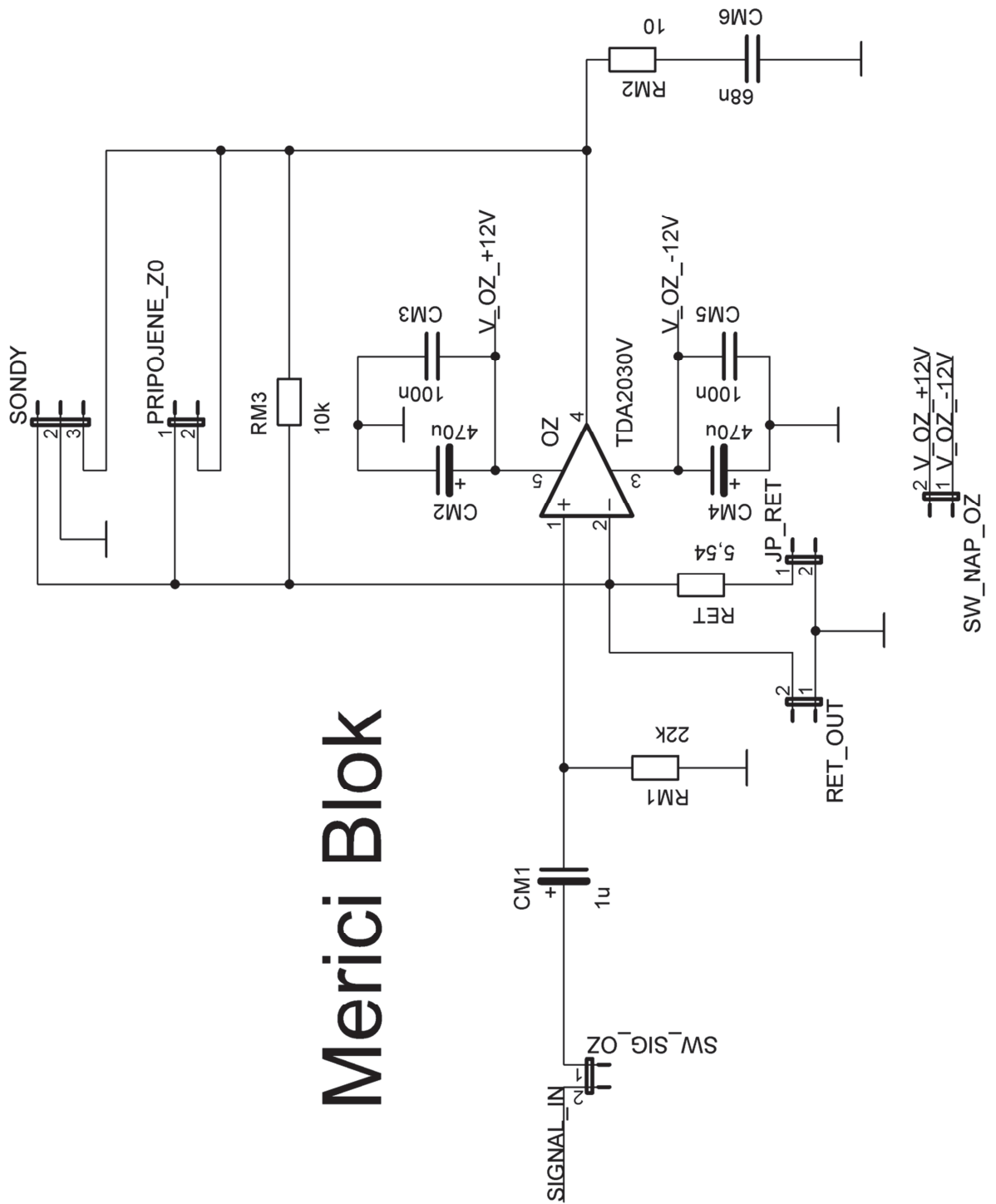


Obrázek B1 Elektrické schéma zapojení bloku napájení

Blok Generator

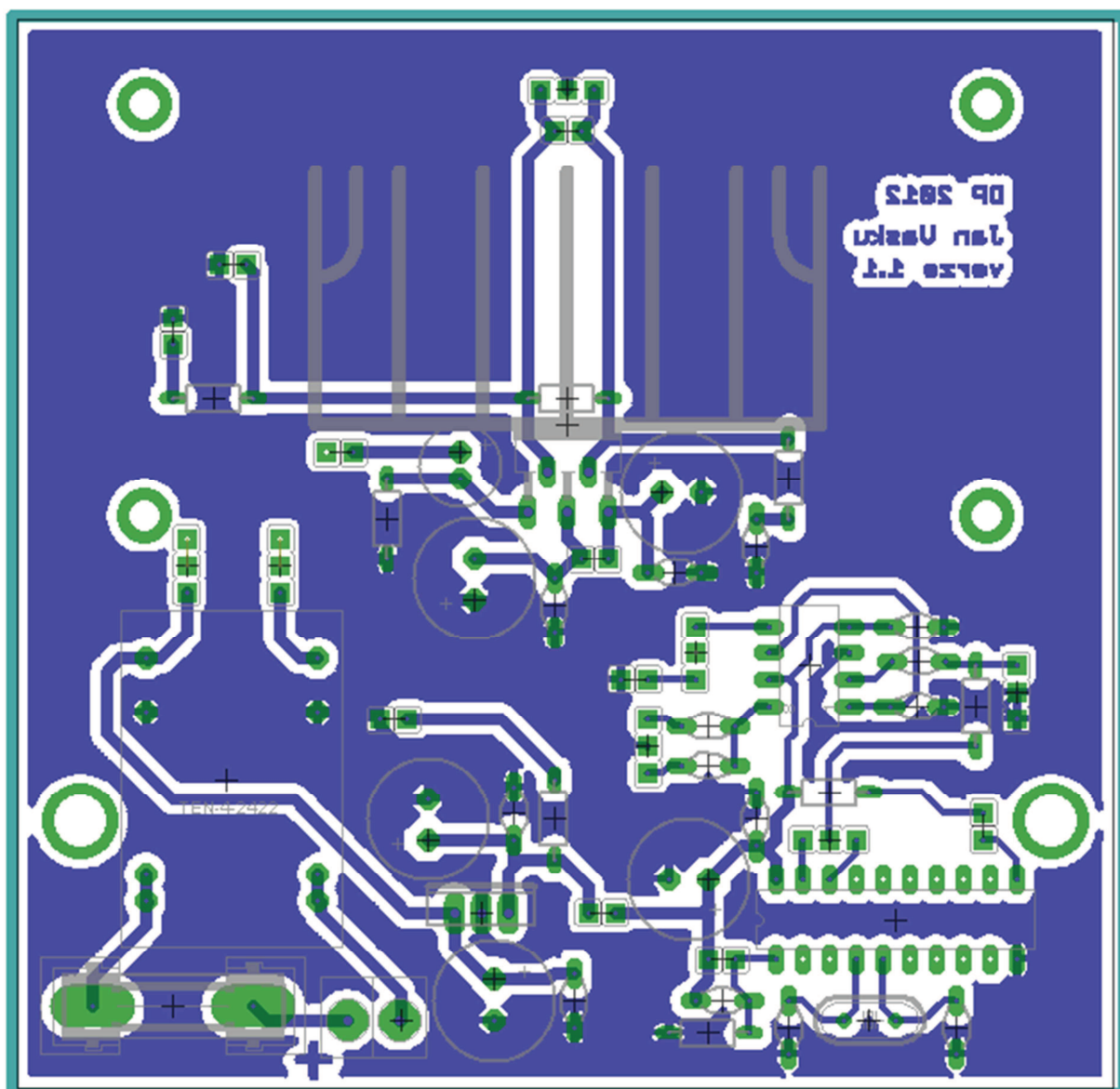


Obrázek B2 Elektrické schéma zapojení bloku generátor

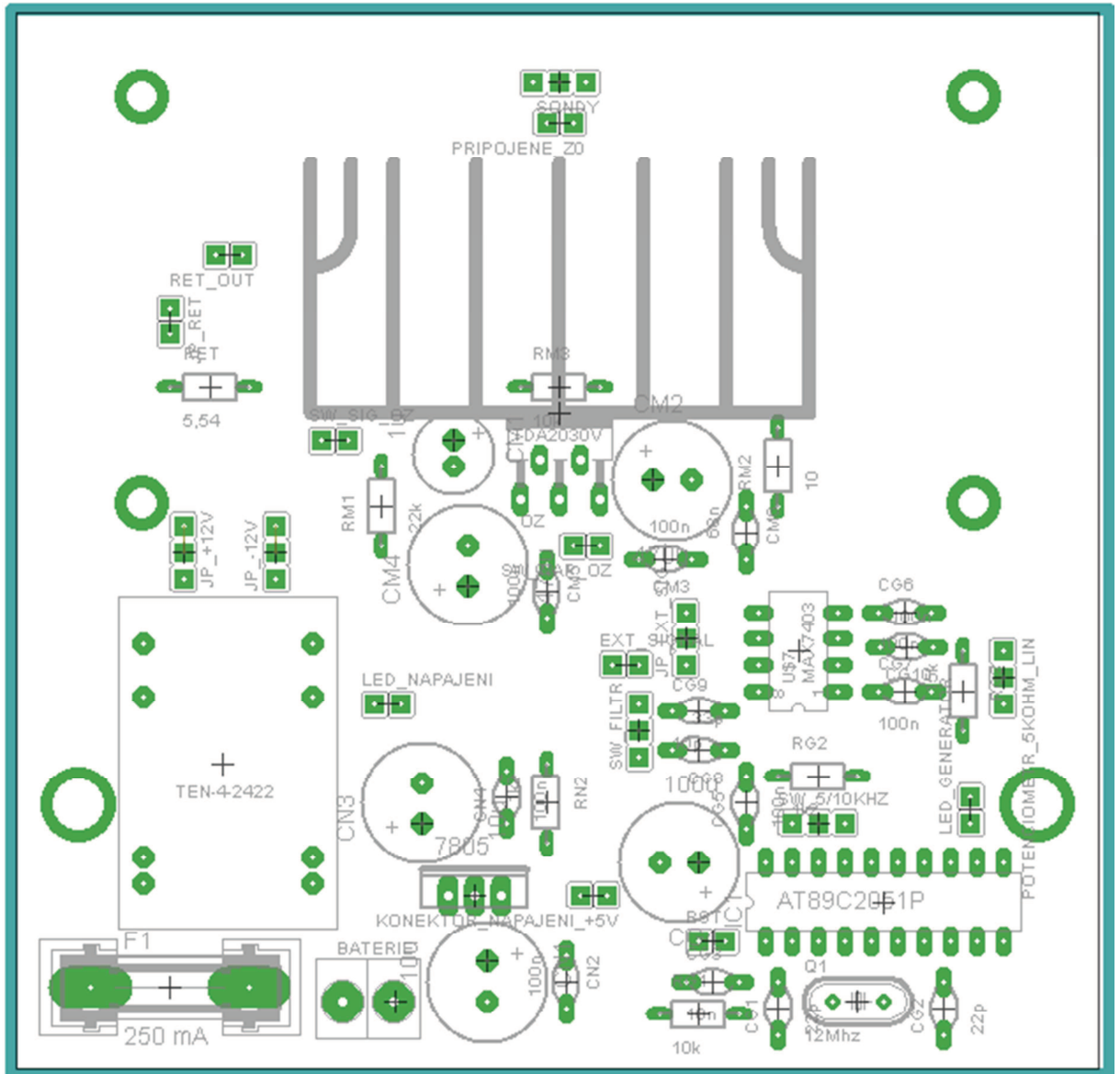


Merici Blok

Obrázek B3 Elektrické schéma zapojení měřicího bloku



Obrázek B4 Navržená DPS, výkres vodivých cest



Obrázek B5 Navržená DPS, osazovací výkres