

# **Metody detekce položených metalických vedení**

Bc. Michael Galia

---

Diplomová práce  
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michael Galia**  
Osobní číslo: **A12272**  
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Metody detekce položených metalických vedení**

Téma anglicky: **Metal Cable Localization Methods**

Zásady pro vypracování:

1. Nastudujte a popište fyzikální principy používané při detekci položených metalických vedení.
2. Vypracujte stručnou rešerši komerčně nabízených řešení.
3. Seznamte se simulačním programem WIPL.
4. Provedte počítačovou simulaci některé v praxi používané metody, tj. vybuzení vedení a odběr signálu z vedení.
5. Pro simulovaný vybraný model sestavte přibližný analytický model a provedte srovnání s numerickým modelem.
6. Pro jeden z používaných principů pro detekci položených vedení provedte experimentální ověření tohoto způsobu detekce za pomoci techniky dostupné v laboratoři bezpečnostních technologií.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. MAAS, Stephen A. The RF and microwave circuit design cookbook. Boston: Artech House, xviii, 267 s. ISBN 08-900-6973-5.
2. ČERNOHORSKÝ, Dušan. Elektromagnetické vlny a vedení. Brno: VUT, 1995, 122 s. ISBN 80-214-0697-6.
3. RACHIDI, F a S TKACHENKO. Electromagnetic field interaction with transmission lines: from classical theory to HF radiation effects. 1. vyd. Boston: WIT, c2008, 122 s. ISBN 18-456-4063-2.
4. ORFANIDIS, Sophocles. RUTGERS UNIVERSITY. Electromagnetic Waves and Antennas [online]. 2008. Dostupné z: <http://www.ece.rutgers.edu/orfanidi/ewa/>.
5. POZAR, David M a S TKACHENKO. Microwave engineering: from classical theory to HF radiation effects. 2nd ed. New York: Wiley, 1997c1998, 259 p. ISBN 04-711-7096-8.
6. Mohr, Richard J., Coupling between Lines at High Frequencies, Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on , vol.9, no.3, pp.127,129, Dec. 1967, doi: 10.1109/TEM.1967.4307480.

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Stanislav Goňa, Ph.D.**

Ústav elektroniky a měření

Datum zadání diplomové práce:

**7. února 2014**

Termín odevzdání diplomové práce:

**27. května 2014**

Ve Zlíně dne 7. února 2014

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
*děkan*



doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.  
*ředitel ústavu*

### **Prohlašuji, že**

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

### **Prohlašuji,**

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- Že odevzdaná verze diplomové/bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....  
podpis diplomanta

## **ABSTRAKT**

Práce se zaměřuje na lokalizaci metalického vedení s použitím laboratorních prostředků. Teoretická část práce popisuje základní principy lokalizace kabelového vedení. Zaměřuje se především na popis používaných frekvenčních rozsahů, způsobů zavedení signálu na vedení a na kapacitní a indukční vazbu. V této části je zpracována i stručná rešerše prodáváných detektorů vedení. Praktická část práce se zabývá výpočtem vázaného vedení s pomocí s-parametrů a následnou simulací vázaného vedení provedenou pomocí programu WIPL-D. V závěru práce je provedena lokalizace metalického vedení v laboratoři bezpečnostních technologií.

Klíčová slova: kapacitní vazba, indukční vazba, s-parametry, detektor vedení, detektor kovů, WIPL-D.

## **ABSTRACT**

The work focus on metal cable localization method by using a laboratory equipment. Theoretical part of thesis describes basic principles of metal cable localization. It is primarily focused on description of used frequency range, way to apply signal on metal cable and on capacitive and inductive coupling. In this part is also done a brief research of available cable detectors on the market. Practice part of thesis deals with calculation of coupling wires with the help of s-parameters and subsequent simulation of coupling wires in program WIPL-D. In last part of thesis is done metal cable localization in laboratory of security technology.

Keywords: capacitive coupling, inductive coupling, s-parameters, cable wire detector, metal detector, WIPL-D.

## Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Stanislavu Goňovi, Ph.D., za odborné vedení, za konzultace, cenné rady a připomínky, které mi poskytoval během zpracovávání mé diplomové práce.

## OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>10</b>
<b>1 DŮVODY VYUŽITÍ LOKALIZACE KABELOVÉHO VEDENÍ.....</b>	<b>11</b>
<b>2 PRINCIPY LOKALIZACE KABELOVÉHO VEDENÍ.....</b>	<b>12</b>
2.1 POUŽITÉ FREKVENCE PŘI AKTIVNÍ METODĚ .....	12
2.2 ZPŮSOBY ZAVEDENÍ SIGNÁLU .....	13
2.2.1 Vodivě .....	13
2.2.2 Vazebně.....	14
2.2.3 Vazebně pomocí kleští .....	14
2.3 PASIVNÍ METODA.....	14
2.4 ZPŮSOBY VYHLEDÁNÍ.....	15
2.4.1 Kapacitní princip .....	15
2.4.2 Indukční princip .....	18
2.4.3 Elektromagnetický princip .....	21
2.4.3.1 Indukce vířivých proudů.....	22
2.4.3.2 Princip detektorů kovů.....	23
<b>3 S – PARAMETRY.....</b>	<b>25</b>
3.1 VLNOVÉ PROMĚNNÉ .....	25
3.2 POSTUPNÁ VLNA .....	28
3.3 VÍCE PORTOVÉ S-PARAMETRY.....	28
3.4 PŘEVOD MEZI S-PARAMETRY A JINÝMI PARAMETRY .....	29
3.5 VYJÁDRĚNÍ DVOU PORTOVÉHO ZAPOJENÍ .....	30
<b>4 ROZDĚLENÍ PRODUKTŮ NA TRHU.....</b>	<b>32</b>
4.1 REŠERŠE PRODUKTŮ.....	33
<b>5 SEZNÁMENÍ SE S PROGRAMEM WIPL-D.....</b>	<b>39</b>
5.1 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI.....	39
5.2 GRAFICKÉ ROZHRAŇÍ .....	39
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>42</b>
<b>6 VÝPOČET VÁZANÉHO VEDENÍ TVOŘENÉHO 2 VODIČI KRUHOVÉHO PRŮŽEZU .....</b>	<b>43</b>
<b>7 SIMULACE V PROGRAMU WIPL-D.....</b>	<b>47</b>
7.1 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SIMULACE S VÝPOČTENÝMI HODNOTAMI. ....	49
<b>8 POUŽITÉ PŘÍSTROJE PŘI MĚŘENÍ .....</b>	<b>50</b>
<b>9 MĚŘENÍ VEDENÍ UTP POMOCÍ DETEKTORU CP M-700 A GENERÁTURU WHG .....</b>	<b>53</b>
9.1 NASTAVENÍ DETEKTORU CPM-700.....	53
9.1.1 Měření na rozhraní buzeného a vázaného vedení .....	54
9.1.2 Měření 50 cm od vázaného vedení.....	55
9.1.3 Měření ve větších vzdálenostech od vázaného vedení.....	57
9.2 ZÁVĚR MĚŘENÍ.....	57
<b>10 MĚŘENÍ VEDENÍ UTP POMOCÍ SPEKTRÁLNÍHO ANALYZÁTORU FSH3 A GENERÁTURU SM300.....</b>	<b>58</b>

10.1	NASTAVENÍ SPEKTRÁLNÍHO ANALYZÁTORU FSH3.....	58
10.2	NASTAVENÍ GENERÁTORU SM300 .....	58
10.2.1	Měření na rozsahu buzeného a vázaného vedení .....	58
10.2.2	Měření 50 cm od vázaného vedení.....	60
10.2.3	Měření ve větších vzdálenostech od vázaného vedení.....	61
10.3	ZÁVĚR MĚŘENÍ.....	61
<b>11</b>	<b>MĚŘENÍ VEDENÍ 230V POMOCÍ DETEKTORU CMP-700 A GENERÁTORU WHG .....</b>	<b>62</b>
11.1	NASTAVENÍ DETEKTORU CPM-700.....	62
11.1.1	Měření na rozhraní buzeného a vázaného vedení .....	62
11.1.2	Měření 50 cm od vázaného vedení.....	64
11.1.3	Měření na větší vzdálenosti od vázaného vedení.....	65
11.2	ZÁVĚR MĚŘENÍ.....	66
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>67</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>69</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>71</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>72</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>74</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>75</b>



## ÚVOD

V dnešní době je k dispozici stále více elektrických zařízení. Tyto zařízení je ve většině případů nutné připojit do elektrické či datové sítě. Je proto nutné mít dokonalý přehled o tom, kudy tyto elektrické a datové sítě vedeny a to především z důvodu údržby a případných stavebních úprav.

Lokalizace vedení je však nutná i při obranně technické prohlídce. Pokud se při této prohlídce najdou nestandardní zařízení v daném prostoru, je nutné vedení k těmto zařízením dohledat. Informace jsou totiž v dnešní době velmi cenné a je nutné je chránit. V řadě případů jsou to právě informace o daných produktech, strategii podniku, či například o připravovaných zakázkách, které jsou pro podnik velmi důležité a jejichž vyzrazení, nebo využití konkurencí by mohlo znamenat výrazné ztráty.

Při práci s těmito informacemi je tedy nutné dbát zvýšené opatrnosti. Ochrana by se především měla skládat z fyzických a režimových opatření. Avšak i přes nejdokonalější opatření existuje vždy riziko kompromitace daného prostoru a je tedy nezbytné, aby se tyto prostory kontrolovaly pomocí pravidelných obranně technických prohlídek.

Ve své diplomové práci se zaměřím na popis základních principů lokalizace kabelového vedení, jako jsou možnosti zavedení signálu na vedení, použité frekvence při lokalizaci a principy detekce těchto signálů. V praktické části poté vypracuji simulaci vázaného vedení a následně provedu i jeho výpočet. V poslední části poté provedu praktické měření v laboratoři bezpečnostních technologií s pomocí dostupného vybavení.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 DŮVODY VYUŽITÍ LOKALIZACE KABELOVÉHO VEDENÍ

Lokalizace kabelového vedení je nutná zejména v těch případech, ve kterých neznáme přesnou trasu vedení. Toto může nastat z několika důvodů:

- není k dispozici přesná stavební dokumentace,
- je nutné vyhledat kabelové vedení k odposlouchávacím zařízením.

Pokud není například k dispozici stavební dokumentace se správnými trasami kabelového vedení, je velmi obtížné provádět jakékoliv stavební úpravy. Pokud se stavební úpravy provádějí za provozu, je neznalost tras kabelového vedení dokonce velmi nebezpečná a to z toho důvodu, že je možnost porušit vedení pod napětím čímž vznikne možnost úrazu elektrickým proudem. Dalším důvodem, kdy se potřebuje lokalizovat kabelové vedení je při provádění revize elektrických zařízení. Pokud totiž nejsou k dispozici přesné plány položeného vedení, neměl by revizní technik provést revizi elektrických zařízení. Také by se měla vyhledávat položená infrastrukturní vedení, protože není vždy záruka toho, že plány těchto vedení jsou nejnovější a při výkopových pracích by mohlo dojít k poškození velmi důležitých vedení.

Dalším důvodem k použití detektorů položeného vedení, je odhalení vedení od odposlouchávacích zařízení. Pokud se při obranně technické prohlídce narazí na odposlouchávací zařízení, je nezbytně nutné lokalizovat veškerou kabeláž, která k tomuto zařízení vedla. To především proto, aby se tato vedení odstranila a současně se zajistilo, že příště nebude možné využít stejné zranitelnosti daného prostředí.

## 2 PRINCIPY LOKALIZACE KABELOVÉHO VEDENÍ

Pro lokalizaci kabelového vedení lze využít dvou základních principů: [1]

- aktivní metody,
- pasivní metody.

Rozdělení podle způsobu zavedení signálu na vedení u aktivní metody:

- vodivé spojení,
- vazebně,
- vazebně pomocí kleští.

Rozdělení způsobů vyhledávání:

- kapacitní princip,
- indukční princip,
- elektromagnetický princip.

### 2.1 Použité frekvence při aktivní metodě

Aktivní metoda je založena na použití frekvenčního generátoru, který se připojí na hledané vedení, a poté je pomocí různých fyzikálních metod vedení vyhledáno. V zásadě je použito čtyř frekvenčních rozsahů. Jsou to nízké frekvence do 1 kHz, střední frekvence od 1 kHz do 10 kHz, vysoké frekvence od 10 kHz do 100 kHz a velmi vysoké frekvence nad 100 kHz. Každý frekvenční rozsah je poté vhodný k jiné aplikaci. [2]

#### Nízké frekvence do 1 kHz

Tyto frekvence obvykle umožňují přesnou lokalizaci v prostorech, kde je velmi mnoho vedení a čím nižší frekvence bude použita, tím přesnější měření bude. Tyto frekvence jsou též nejlepší k detekci na dlouhé vzdálenosti a také se při těchto frekvencích nevytváří vazby s dalšími položenými vedeními. Tyto frekvence jsou však velmi nízké pro využití vazebního principu a lze je uplatnit pouze pro vodivé spojení.

#### Střední frekvence od 1 kHz do 10 kHz

Tento rozsah frekvencí je v praxi používán nejčastěji. Střední frekvence nemají takový dosah jako nízké frekvence, ale s použitím vazební klešťové metody je možné detekci provést až do vzdálenosti 1,5 km. Při těchto frekvencích se vytvářejí vazby

u blízko položeného vedení, avšak ne v takové míře jako u vysokých frekvencí. Tyto frekvence však nemusí být dostatečné k naindukování silného signálu na vedeních s malým průměrem.

### **Vysoké frekvence od 10 kHz do 100 kHz**

Vysoké frekvence se rychle utlumují se vzrůstající vzdáleností v porovnání s nízkými a středními frekvencemi. Výhoda vysokých frekvencí je však v tom, že se velmi dobře šíří ve vedeních s malým průměrem. Pokud je přijímaný signál již na začátku vedení velmi slabý, měla by se zvolit vyšší frekvence. Při tomto rozsahu již vznikají silné vazby s dalšími blízko položenými vedeními.

### **Velmi vysoké frekvence od 100 kHz**

Tyto frekvence se velmi rychle utlumují s rostoucí vzdáleností od zdroje signálu a používají se proto pouze k detekci na kratší vzdálenosti. Velmi vysoké frekvence jsou schopné překonat malé nevodivé mezery a lze je tak použít pro vyhledání vedení, které bylo přerušeno, a které by s nižšími frekvencemi nebylo možné najít. Při těchto frekvencích se tvoří velmi silné vazby s dalšími položenými vedeními, a proto lze vyhledat i další vedení, na které není přímo generován signál.

## **2.2 Způsoby zavedení signálu**

### **2.2.1 Vodivě**

Připojení generátoru signálu přímo na hledané vedení nám umožní nejpřesnější vyhledání položeného vedení. Při použití nízkých frekvencí nebude docházet k vazbám s dalším položeným vedením a nízké frekvence jsou též vhodné k detekci kabelů na velké vzdálenosti. Velmi důležité je při vodivém spojení dbát na uzemnění. Signál jde do země na vzdáleném konci a vrací se k vysílači pomocí zemnicího kolíku. Pokud není vodič na vzdáleném konci správně uzemněn, nebo není správně uzemněn vysílač, bude signál velmi slabý, popřípadě nedetekovatelný. Platí tedy, že čím lepší bude uzemnění, tím silnější bude signál. Zemnicí kolík vysílače by se tedy měl umístit co nejdále konce vedení a co nejdále od pravděpodobné cesty položeného vedení. Obecně by se měl zemnicí kolík vysílače umístit v 90° od předpokládané trasy vedení. [3]

### 2.2.2 Vazebně

Tato metoda je nejjednodušší pro zavedení signálu na hledané vedení. Vysílač se totiž pouze umístí přímo nad hledané vedení. Když je vysílač zapnut, je signál vazebně naindukován do jakýchkoliv paralelně vedených vedení v dosahu. Je proto důležité umístit vysílač přímo nad vedení, aby se minimalizovala možnost naindukování signálu na jiných položených vedeních. Pokud ovšem není známá alespoň malá část trasy, nelze tuto metodu aplikovat, protože tato metoda vyžaduje přesné umístění vysílače. Síla signálu závisí na třech věcech:

- frekvenci vysílače,
- jak dobře je vodič uzemněn,
- jak hluboko je hledané vedení.

Je nutno též brát ohled na to, že přijímač může zachytit signál vysílače skrze vzduch a ne srze vedení. Tato vzdálenost by měla být uvedena v manuálu. [4]

### 2.2.3 Vazebně pomocí kleští

Podobně jako v předešlé metodě, je signál na vedení indukován nepřímo. V tomto případě je však mít k dispozici část vedení, okolo kterého se umístí vazební kleště. Tyto kleště poté indukují signál do hledaného vedení. Čelisti kleští se musí zcela uzavřít, aby byl přenos možný. Jako u předešlých metod, i zde musí být vzdálený konec hledaného vedení uzemněný. Pokud se kleště umístí mezi dva uzemněné konce, bude naindukovaný signál pouze mezi těmito dvěma uzemněnými body. [5]

## 2.3 Pasivní metoda

V pasivním módu vysílač nevysílá žádný signál a přijímač hledá frekvenci 50 popřípadě 60 Hz. Ačkoliv je toto velmi nízká frekvence, je zde možnost vazby s dalšími blízko položenými vedeními. Lze tedy určit přibližnou polohu, nelze však provést přesnou lokalizaci, protože není možné určit, zda se jedná o vedení, blízké potrubí, nebo železnou výztuhu. Většinu napájecích kabelů je pak jednoduché vyhledat, pokud nejsou navrženy k co nejmenšímu vyzařování signálu.

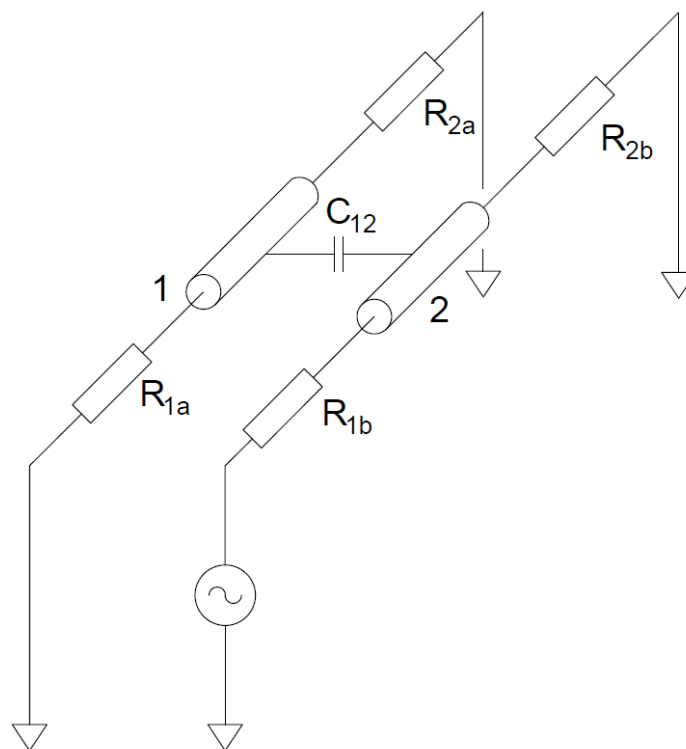
U tří fázových soustav se frekvence vyruší, proto se hledají násobky harmonických frekvencí. V případě sítě 50 Hz se hledá jedenáctá harmonická frekvence (550 Hz). [6]

## 2.4 Způsoby vyhledání

### 2.4.1 Kapacitní princip

Kapacitní vazba je zapříčiněna existencí parazitních kapacit mezi vodiči, popřípadě mezi jednotlivými částmi obvodu. Parazitní kapacitou modelujeme elektrickým polem, které existuje mezi každými dvěma vodiči s různým potenciálem. Toto nastává především při souběžném vedení energetických či signálových kabelů. [2], [3]

Námi počítaný obvod vypadá následovně:

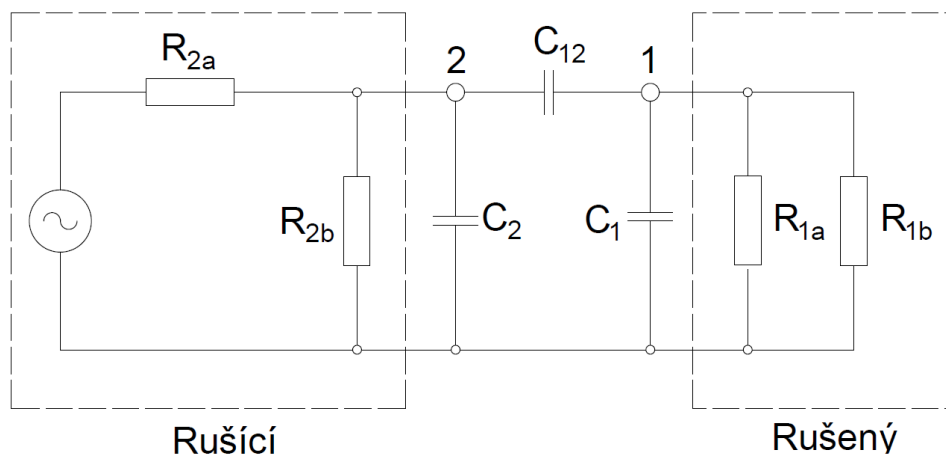


Obr. 1. Obvod s kapacitní vazbou.

Kde:

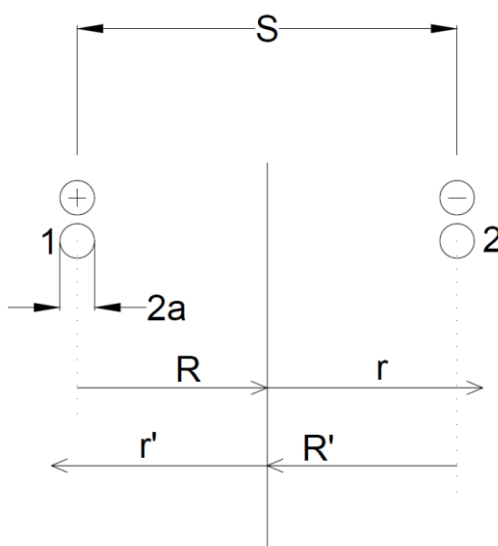
$$R_{2a} \text{ a } R_{2b} = \infty, R_{1a} = 100 \text{ k}\Omega, R_{1b} = 0 \text{ k}\Omega, f = 10 \text{ MHz}.$$

Náhradní schéma obvodu poté vypadá následovně:



Obr. 2. Náhradní schéma obvodu s kapacitní vazbou. [4]

Pole mezi válcovými vodiči poté vypadá takto:



Obr. 3. Znázorněné pole mezi vodiči. [5]

Nejdříve si musíme definovat základní rovnice:

$$F_{Q2} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q_1 Q_2}{R^2} \quad (2.1)$$

$E$  se tedy bude rovnat:

$$E = \frac{F_{Q2}}{Q_2} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q_1}{R^2} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \frac{\tau}{R} \quad (2.2)$$

Dále se použije rovnice pro elektrický potenciál a za  $Q$  se dosadí  $\tau$ .

$$\varphi = \frac{\tau}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{1}{R}\right)s \quad (2.3)$$

Elektrické pole tedy bude:



$$E_{(R)} = E_{1(R)} + E_{2(R)} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left( \frac{\tau}{R} + \frac{\tau}{S-R} \right) \quad (2.4)$$

$$\varphi_{(R)} = \varphi_{1(R)} + \varphi_{2(R)} = \frac{1}{2\pi\epsilon} (\ln R + \ln S - R) \quad (2.5)$$

Výpočet pro osamocený vodič 1:

$$\varphi_1 = \frac{\tau}{2\pi\epsilon} \ln R \quad (2.6)$$

Výpočet pro osamocený vodič 2:

$$\varphi_2 = \frac{-\tau}{2\pi\epsilon} \frac{1}{R'} = -\frac{\tau}{2\pi\epsilon} \ln(S - R) \quad (2.7)$$

Nyní se může vypočítat napětí  $U_1$  a  $U_2$ :

$$U_1 = \frac{\tau}{2\pi\epsilon} (-\ln a + \ln(S - a)) \quad (2.8)$$

$$U_2 = \frac{\tau}{2\pi\epsilon} (-\ln(S - a) + \ln(a)) \quad (2.9)$$

Celkové napětí  $U$  se vypočítá jako:

$$U = U_1 - U_2 = \frac{\tau}{\pi\epsilon} (-\ln a + \ln(S - a)) \quad (2.10)$$

$$U = \frac{\tau}{\pi\epsilon} \ln \left( \frac{S-a}{a} \right) \quad (2.11)$$

Pro výpočet kapacity se využije následujících vztahů:

$$Q = CU \Rightarrow C = \frac{Q}{U} = \frac{\tau}{U} = \frac{\tau}{\frac{\tau}{\pi\epsilon} \ln \left( \frac{S-a}{a} \right)} \quad (2.12)$$

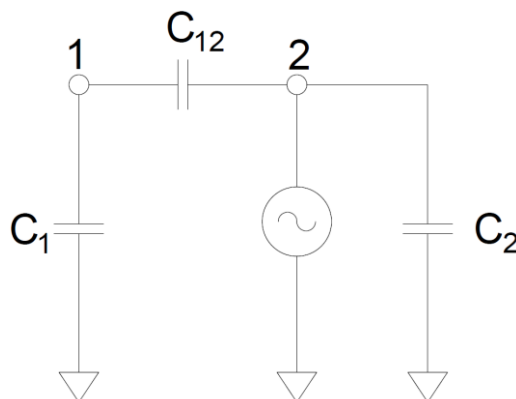
$$C_{1,2} = \pi\epsilon \frac{1}{\ln \left( \frac{S-a}{a} \right)} \quad (2.13)$$

Impedance následně bude:

$$Z = \frac{1}{C \times C_1} = 120 \times \ln \left( \frac{S-a}{a} \right) \quad (2.14)$$

$$Z = 270 \times \log \left( \frac{S}{a} \right) \quad (2.15)$$

Pro výpočet kapacity se využije náhradní schéma bez odporů:



Obr. 4. Náhradní schéma bez odporů

Pro výpočet použijeme hodnoty  $S = 10\text{ cm}$ ,  $2a = 1\text{ mm}$ ,  $l = 200\text{ cm}$ , výška nad zemí bude uvažována nekonečno. Podle rovnice (2.13) dosadíme zadané hodnoty a vypočítáme kapacitu  $C_{12}$ . Kapacita  $C_{12}$  vyjde 9,45 pF. Následně se podle vzorce (2.16) vypočítá kapacita  $C_1$ .

$$C_1 = 2\pi\epsilon \left[ \ln \left( \frac{2h-r}{r} \right) \right]^{-1} \quad (2.16)$$

Kapacita  $C_1$  vyjde 3,66 pF na 1m. V našem případě tedy bude kapacita  $C_1$  7,32 pF. Dále se vypočítá napětí  $U_1$  z rovnice (2.17).

$$U_1 = U \frac{X_{c12}}{X_{c1} + X_{c12}} \quad (2.17)$$

Napětí  $U_1$  vyjde 0,56 V. Z těchto výsledků lze dále vypočítat útlum  $A_{udB}$ , který je -5 dB.

Tento princip detekce vedení má následující výhody a nevýhody.

#### Výhody:

- hledané vedení lze vybudit vzdáleně bez nutnosti přímého přístupu,
- lze využít i na aktivní vedení.

#### Nevýhody:

- přesnost lokalizace zaleží na vzdálenosti generátoru od hledaného vedení.

### 2.4.2 Indukční princip

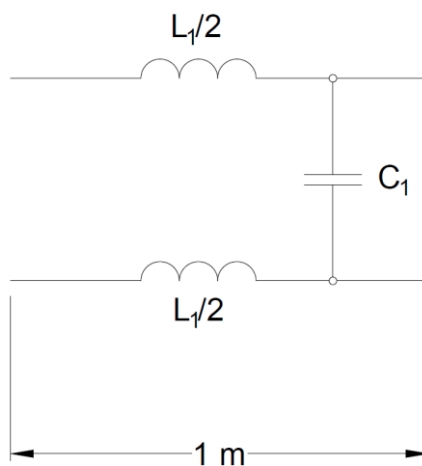
Pokud prochází obvodem elektrický proud, vzniká v okolí tohoto vodiče magnetické pole. Toto pole může být buď konstantní, nebo proměnné, a to v závislosti na časovém průběhu proudu. Ve vodičích umístěných v časově proměnném magnetickém poli se indukuje napětí, jež roste se vzrůstajícím kmitočtem. V našem případě uvažuje kroucenou

dvoulinku s odporem  $100\ \Omega$ , generátor s napětím  $1\ \text{V}$  a frekvencí  $10\ \text{MHz}$ . Vedení bude definováno následovně.



Obr. 5. Definovaná dvoulinka

Náhradní schéma kroucené dvoulinky poté bude:



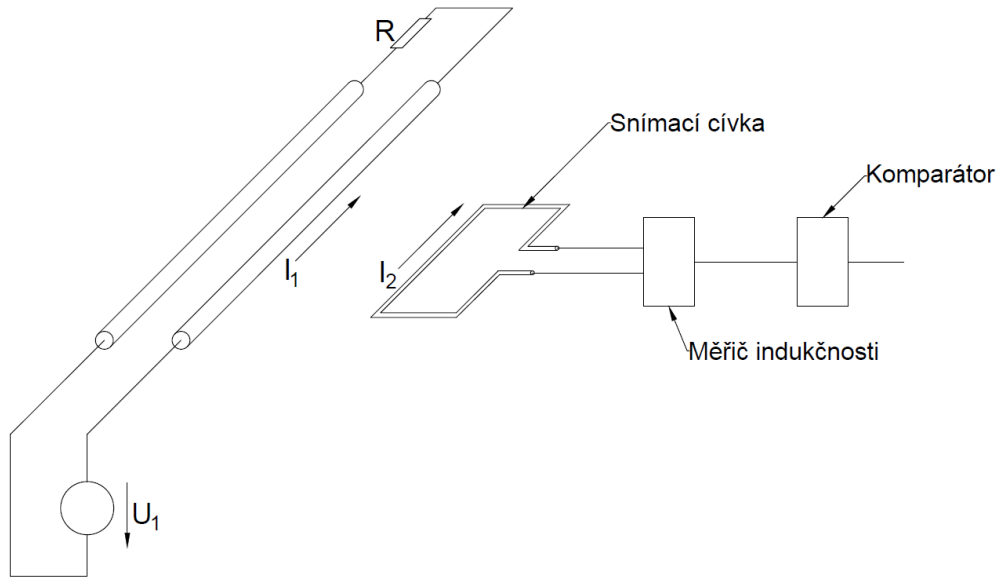
Obr. 6. Náhradní schéma kroucené dvoulinky

Nyní se vypočítá indukčnost. K tomu jsou potřeba znát následující vzorce:

$$Z = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \Rightarrow Z^2 = \frac{L_1}{C_1} \Rightarrow L_1 = Z^2 C_1 \quad (2.18)$$

$$C_1 = \frac{1}{c C_1} \quad (2.19)$$

Využitím vzorců (2.18) a (2.19) vypočítáme indukčnost.  $L_1 = 333\ \text{nH}$ . Nyní se definuje měřicí soustava (obr. 7). Zde se musí zjistit velikost  $I_2$  a  $L_2$ .



Obr. 7. Měřicí soustava indukčního principu měření.

Aby bylo možné vypočítat indukčnost  $L_2$  použijeme vzorec (2.20).

$$U_2 = j\omega L_2 I_2 + j\omega M_{12} I_1 \quad (2.20)$$

První část vzorce (2.20) tvoří vlastní indukance a druhou část vzájemná indukance.

$$M_{12} = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (2.21)$$

Díky malému činiteli vazby  $k$ , bude  $M_{12}$  mnohem menší jak  $L_2$ . Po úpravě rovnic (2.20) a (2.21) vyjde následující:

$$U_2 = j\omega \left( L_2 \times I_2 + k\sqrt{L_1 L_2} \times I_1 \right) \quad (2.22)$$

Hodnotu  $k$  lze určit empiricky z intervalu  $k_{max} = 10^{-2}$ ,  $k_{str} = 10^{-3}$ ,  $k_{min} = 10^{-9}$ . V dalších výpočtech bude použito  $k_{str}$ . V reálném případě by však bylo možné hodnotu  $k$  změřit. Dále se vytkne z rovnice (2.22)  $j\omega I_2$ .

$$U_2 = j\omega I_2 \times \left( L_2 + k\sqrt{L_1 L_2} \frac{I_1}{I_2} \right) \quad (2.23)$$

Jestliže vlastní indukčnost je 100% a vzájemná indukčnost 10%, může rovnici (2.23) dále upravit a vytknout  $L_2$ .

$$\frac{k\sqrt{L_1 L_2} I_1}{L_2 I_2} = 0,1 \quad (2.24)$$

$$L_2 = \frac{k^2 L_1}{0,01} \left( \frac{I_1}{I_2} \right)^2 \quad (2.25)$$

Nyní pomocí rovnice (2.22) sestavíme tabulky poměrů  $\frac{I_1}{I_2}$ , aby byla snímací cívka realizovatelná.

Tab. 1. Poměr hodnot  $\frac{I_1}{I_2}$

$I_1/I_2$	$I_1$ [mA]	$L_2$
10x	1	3,3 nH
100x	0,1	330 nH
1000x	0,01	33 $\mu$ H

Z tabulky vyplývá, že pro realizovatelnost snímací cívky, se musí zvolit poměr  $\frac{I_1}{I_2}$  1000x.

Proud  $I_1$  bude tedy velmi velký ( $\approx 10$  mA) a proud  $I_2$  velmi malý ( $\approx 100$   $\mu$ A). Tento poměr umožní dosáhnout dostatečné citlivosti a poziční přesnosti.

Tato metoda detekce má následující výhody a nevýhody.

#### Nevýhody:

- metoda je aktivní, tzn., že se sledované vedení musí vybudit proudem  $I_1$ ,
- jeden konec vedení musí zůstat volný a druhý konec musí být zakončený, impedancí 100  $\Omega$ ,
- není vhodné pro velmi dlouhé vedení. ( $l \ll \lambda_{10MHz} \Rightarrow l_{max} = \frac{\lambda_{10MHz}}{4} = 7,5m$ ).

#### Výhody:

- pro vybuzení je použito jiné frekvenční pásmo, než u vlastní sítě.

### 2.4.3 Elektromagnetický princip

Tento princip v zásadě používají detektory kovů. Tyto detektory pro vyhledání feromagnetického i diamagnetického materiálu používají následující principy. [6]

- **Indukce vířivých proudů** - pomocí tohoto principu lze detekovat diamagnetické kovy (měď, stříbro, zlato),
- **Změna orientace magnetických domén** - tímto principem, lze detekovat feromagnetické kovy (železo),
- **Relativní pohyb magnetu vůči cívce** – tento princip lze užít pro detekci tvrdých feromagnetik (trvalé magnety).

Jelikož se zabýváme detekcí vedení, které jsou zpravidla vyrobeny z mědi, budeme se zabývat především principem indukce vířivých proudů.

#### 2.4.3.1 Indukce vířivých proudů

*„Budící, časově proměnné elektromagnetické pole detektoru o magnetické indukci  $B$  indukuje v každé pomyslné uzavřené vodivé smyčce v kontrolovaném prostoru elektrické napětí dle indukčního zákona. Elektromagnetická indukce je fyzikální jev, ke kterému dochází v nestacionárním (nestálém) magnetickém poli. Toto magnetické pole v cívce vytváří indukované elektrické pole. To charakterizuje indukované elektromotorické napětí. Pokud je k cívce připojen elektrický obvod, prochází jím indukovaný elektrický proud.“ [6]*

Nestacionární magnetické pole může tedy způsobit:

- nepohybující se vodič, kterým prochází měnící se proud,
- pohybující se vodič s proměnným nebo konstantním proudem,
- pohybující se elektromagnet nebo permanentní magnet.

Jestliže vzniká indukované napětí v libovolné pomyslné uzavřené smyčce, elektrický proud může smyčkou protékat pouze tehdy, jestliže jsou všechny části smyčky ve vodivém prostředí. Ohmický odpor vodivého prostředí, tedy ovlivňuje velikost proudu. Elektrický proud však nevzniká pouze v drátových smyčkách, ale i v tělesech různých tvarů, kde se indukuje proud pomocí kruhového pohybu volných elektronů. Tyto proudy se nazývají Foucaultovy, nebo také vířivé proudy. [6]

Samy vířivé proudy jsou pak zdrojem elektromagnetického pole, které je detekováno přístrojem. Pro indukované elektromagnetické pole platí Lenzův zákon, který říká: *„Indukovaný elektrický proud v uzavřeném obvodu má takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického indukčního toku, která je jeho příčinou.“*

Velikost naindukovaného napětí závisí na velikosti indukčního toku, který projde kovovým předmětem a ploše předmětu, která je kolmá k siločarám budícího indukčního toku. Z toho vyplývá, že orientace předmětu k siločarám budícího napětí a také jeho tvar a velikost, jsou velmi důležité pro vlastní detekci. [6]

### 2.4.3.2 *Princip detektorů kovů*

U všech detektorů kovů se musí magnetické pole měnit v čase. To může být dosaženo generováním krátkých pulzů s periodou, u které je mezi proudy nula, nebo formou harmonického signálu. [7]

Z tohoto hlediska můžeme detektory zařadit do tří skupin:

- BFO – detektory se závějovým oscilátorem,
- PI – pulsní detektory,
- VLF – velmi nízká frekvence.

Detektory BFO používají k identifikaci kovových předmětů změnu indukčnosti hledané cívky poté, co se přiblíží k danému kovovému předmětu. Detektor se skládá ze dvou oscilátorů. Jeden je referenční a druhý měřicí. Referenční oscilátor kmitá konstantní frekvencí, která je v klidovém stavu velmi blízká frekvenci měřicího oscilátoru. Rezonanční LC obvod měřicího oscilátoru obsahuje hledací cívku, která je buzena sinusovým signálem a vlivem vnějšího prostředí se mění její indukčnost a tím se rozladí oscilátor. Detektory BFO využívají nejstarší technologii a dnes se již nepoužívají. [8]

Činnost detektorů PI je založena na měřícím cyklu, který začíná připojením napětí k vysílací cívce. V okolí cívky se vytvoří ustálené magnetické pole, které prochází okolním prostředím. Poté se buzení cívka odpojí a pomocí přijímací cívky se zaznamená odezva daného prostředí na změnu magnetického pole. Feromagnetické předměty ve svém okolí vytvářejí sekundární magnetické pole, ze kterého se na přijímací cívce naindukuje napětí. Měřicí cyklus se opakuje s frekvencí 10 až 100 měření za sekundu, což umožní rychlou odezvu detektoru. Energie vyslaných pulzů musí být velmi vysoká, aby se zajistila dostatečná citlivost. Proud tekoucí cívkou může dosáhnout až 50 A a v důsledku toho jsou z tohoto typu detektoru kladeny velké nároky na napájení. [8]

Dnes nejpoužívanější jsou však detektory VLF. Princip detektoru je založen na vyvážených cívkách. Z toho vyplývá, že detektor je složen minimálně ze dvou cívek, z nichž jedna je vysílací a druhá přijímací. Cívky musí být umístěny tak, aby v nepřítomnosti kovového objektu, bylo naindukované napětí na přijímací cívce rovno nule. Toho lze dosáhnout uspořádáním cívek vzájemně pootočených o 90°. Po přiblížení ke kovovému předmětu dojde k deformaci pole vysílající cívky, což způsobí, že se poruší rovnováha a na přijímací straně se objeví napětí značící přítomnost kovu. Pokud tento typ detektoru umístíme nad diamagnetický objekt, bude pole deformováno sekundárním polem zapříči-

něným vířivými proudy. Příjímací napětí bude mít maximální hodnotu v okamžiku největší změny vysílaného napětí. V případě materiál feromagnetického, bude indukované napětí ve fázi s napětím vysílacím. Tento způsob detekce je dnes nejpoužívanější. [9]

Detekce má následující výhody a nevýhody:

**Nevýhody:**

- malá přesnost detekce vedení,
- v případě více položených vedení, není možné přesně určit námi hledané vedení, protože se detekují všechny položené vedení.

**Výhody:**

- nízká cena – tento princip se uplatňuje především u levných detektorů vedení, které však nemají dostatečnou přesnost.



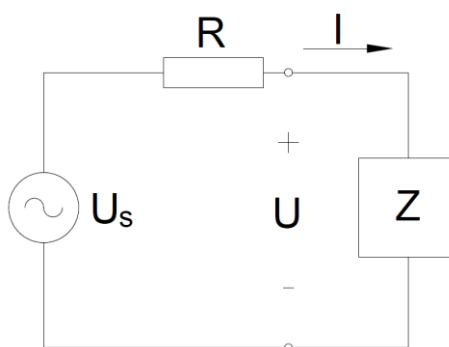
### 3 S – PARAMETRY

Pro správné pochopení a možnost vypočítání vázaného vedení, je nutné uvést princip s-parametrů.

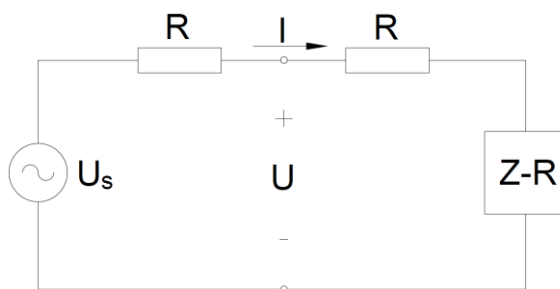
#### 3.1 Vlnové proměnné

Je logické, že v obvodech, které je jednoduché definovat pomocí postupného vlnění, a kde je naopak těžké určit napětí a proud, by bylo k charakterizaci více portů nejlepší využít vlnového znázornění. Obvody samotné pak mohou být popsány jak pomocí napětí a proudů na portech, tak pomocí vlnění a jeho odrazení od těchto portů. Rozdíl mezi vlnovými proměnnými a napěťovými a proudovými proměnnými není však tak velký. Někdy však musíme použít napětí a proud i tam, kde je těžké je přesně definovat. Stejně tak vlnové proměnné mohou být definovány v ideálních obvodech. Naštěstí je možné vytvořit rovnice, kterými vlnové proměnné, napětí a proud propojíme, takže je možné použít vlnové proměnné i napětí a proud pro analýzu obvodů. [10]

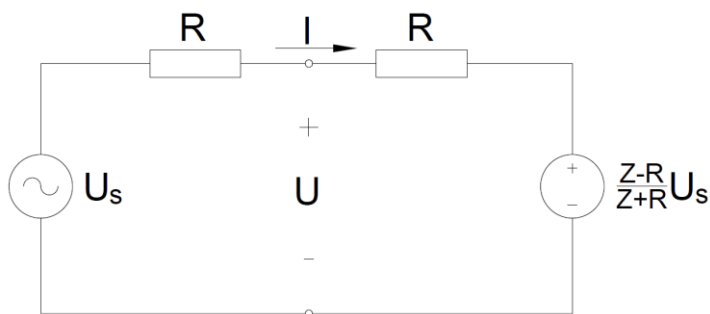
Nejprve uvažujeme jednoduchý, jedno portový obvod s odporem  $R$  a vstupní impedancí  $Z$ . Tento obvod na obr. 8 může být transformován do obr. 9, kde byla výstupní impedance  $Z$  nahrazena odporem  $R$  a impedancí  $Z - R$ . Nakonec se na obr 10. nahradí impedance  $Z - R$  napěťovým zdrojem. [10]



Obr. 8. Jednoportový obvod



Obr. 9 Nahrazení impedance odporem

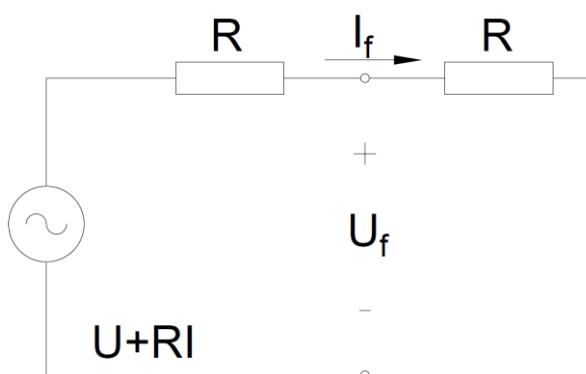


Obr. 10. Nahrazení impedance napětovým zdrojem

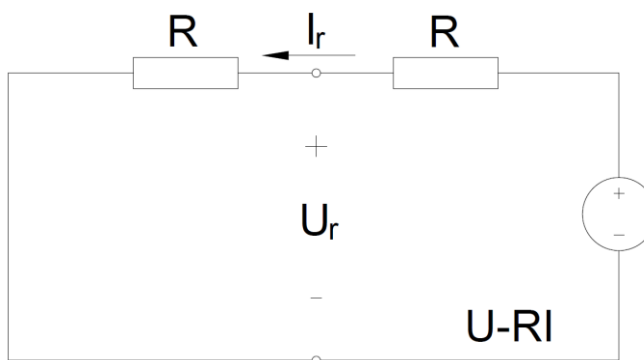
$$I = \frac{U_s}{Z+R} \quad (3.01)$$

$$(Z - R)I = U_x = \frac{Z-R}{Z+R} U_s \quad (3.02)$$

Rovnice (3.02) je velmi podobná rovnici koeficientu odrazu. Aby se toto ještě více zvýraznilo, použije se princip superpozice a podle tohoto principu, budou obvody vypadat následovně:



Obr. 11. Schéma s použitím superpozice



Obr. 12. Schéma s použitím superpozice

Konečné napětí  $U$  je :

$$U = U_f + V_r \quad (3.03)$$

Proud je:

$$I = I_f - I_r \quad (3.04)$$

Nyní se musí vyjádřit vybuzení a napěťový zdroj s konečným napětím. Toho se dosáhne pomocí rovnic:

$$U_s = U + RI \quad (3.05)$$

$$U_x = U - RI \quad (3.06)$$

Podobně se může pro obvod určit:

$$U_f = RI_f \quad (3.07)$$

$$U_r = RI_r \quad (3.08)$$

Pomocí matematických úprav rovnic (3.03), (3.07) a (3.08) se dostane rovnice:

$$U_f = \frac{1}{2}(U + RI) \quad I_f = \frac{U+RI}{2R} \quad (3.09)$$

$$U_r = \frac{1}{2}(U - RI) \quad I_r = \frac{U-RI}{2R} \quad (3.10)$$

Tímto jsou určeny základní vztahy mezi vlnovými proměnnými  $V_f$ ,  $V_r$ ,  $I_f$  a  $I_r$ , a portovým napětím a proudem. Jejich další úpravou se může dosáhnout vztahu mezi více portovými parametry jako admitance, nebo impedance a podobnými více portovými parametry definovanými vlnovými proměnnými. [10]

Nyní se dají vlnové proměnné do tvaru, který vyjadřuje výkon a ne napětí a proud. Aby bylo toto možné, musí se definovat dvě nové vlnové proměnné  $a$  a  $b$ :

$$a = \sqrt{U_f I_f} = U_f \sqrt{R^{-1}} = I_f \sqrt{R} \quad (3.11)$$

$$b = \sqrt{U_r I_r} = U_r \sqrt{R^{-1}} = I_r \sqrt{R} \quad (3.12)$$

Pokud se nyní umocní  $a$  a  $b$  na druhou, získá se hodnota, která je nejen úměrná výkonu, ale také se s nimi zachází jako s normalizovaným napětím a proudem, kde  $R$  je normalizovaný odpor. Nakonec se rovnice (3.09) a (3.10) dosadí do rovnic (3.11) a (3.12), čímž se dostane vztah mezi  $a$ ,  $b$  a konečným napětím a proudem: [10]

$$a = \frac{1}{2} \left( \frac{U}{\sqrt{R}} + I \sqrt{R} \right) \quad (3.13)$$

$$b = \frac{1}{2} \left( \frac{U}{\sqrt{R}} - I \sqrt{R} \right) \quad (3.14)$$

Z rovnic (3.13) a (3.14) lze vyčíst, že vztah mezi  $a$  a  $b$  je pouze koeficient odrazu:

$$\frac{a}{b} = \frac{U_r}{U_f} = \frac{I_r}{I_f} = \Gamma \quad (3.15)$$

A kde  $Z = R = \frac{U}{I}$ :

$$\frac{1}{2} |a|^2 = \frac{|U|^2}{2R} \quad (3.16)$$

Což je dostupný výkon zdroje. Analogicky  $\frac{1}{2} |b|^2$  reprezentuje výkon odražené vlny. Výkon doručený na zátěž  $P_{del}$  je pouze rozdíl mezi těmito dvěma hodnotami.

$$P_{del} = \frac{1}{2} (|a|^2 - |b|^2) = P_{av} (1 - |\Gamma|^2) \quad (3.17)$$

### 3.2 Postupná vlna

Dále se může  $a$  a  $b$  interpretovat jako postupná vlna na vedení s charakteristickým odporem  $R$  připojeným na port. Vlna  $a$  je postupná vlna na portu a  $b$  je odražená vlna. Tyto veličiny jsou komplexní, takže se musí definovat referenční pozice pro jejich fázi. Obvykle je touto pozicí rovina portu. [10]

### 3.3 Více portové S-parametry

Koncept jednoportového zapojení může být velmi jednoduše rozšířen na více portové zapojení. U jednoportového zapojení platí:

$$b = \Gamma a \quad (3.18)$$

Pro více portové zapojení poté platí:

$$b = Sa \quad (3.19)$$

V rovnici (3.19) je  $a$  a  $b$  vektor a  $S$  je nazýváno jako matice s-parametrů. Tato matice vypadá následovně:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{N1} & S_{N2} & \dots & S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_N \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Nyní se mohou identifikovat některé charakteristiky matice:

- $S_{ii}$  je vstupní reflexní koeficient na portu  $i$ , když všechny ostatní porty jsou zakončeny svými normalizovanými odpory,
- $|S_{ij}|^2$  je převodníkový výkonový zisk mezi vstupním portem  $j$  a výstupním portem  $i$ , když jsou všechny ostatní porty zakončeny normalizovanými odpory.

První bod je zřejmý:  $S_{ii} = b_i/a_i$ , když postupné vlny na všech dalších portech  $a_n$  kde  $n \neq i$ , jsou nula. To znamená, že všechny další porty jsou zakončeny svými normalizačními odpory a nejsou vybudeny. Více portové zapojení je redukováno na jednoportové a lze tak aplikovat rovnici (3.18). [10]

Jak je již zmíněno dříve,  $|b_i|^2$  je poměrný výkon odražené vlny. V tomto případě je to dvojnásobek tohoto výkonu. Pokud je vedení zakončeno svou charakteristickou impedancí, je všechen výkon dodán na zátěž na portu  $i$ . Podobně je i  $|a_j|^2$  dvojnásobek dostupného výkonu na portu  $j$ . Takže: [10]

$$|S_{ij}|^2 = \frac{|b_i|^2}{|a_j|^2} = \frac{P_{del}}{P_{av}} \quad (3.21)$$

Kde  $P_{del}$  je dodaný výkon na zátěž a  $P_{av}$  je dostupný výkon zdroje. Poměr těchto dvou hodnot je definován jako výkonový poměr.

### 3.4 Převod mezi S-parametry a jinými parametry

Analogickým způsobem k rovnicím (3.13) a (3.14), je možné určit matice a vektory.

$$a + b = R^{-\frac{1}{2}}U \quad (3.22)$$

$$a - b = R^{-\frac{1}{2}}I \quad (3.23)$$

Kde  $U$  a  $I$  jsou vektory napětí a proudu na portu a  $R^{-\frac{1}{2}}$  je diagonální matice, jejíž prvky jsou druhou odmocninou normalizovaného odporu na každém portu. Rovnice (3.22) a (3.23) lze tedy použít k převodu na jiné parametry. Převod zahrnuje rovnice (3.22) a (3.23) a práci s maticemi. Například převod  $S$  matice na impedanční matici  $Z$ : [10]

$$U = ZI \quad (3.24)$$

Což může být zapsáno i jako:

$$R^{-\frac{1}{2}}U = R^{-\frac{1}{2}}ZR^{-\frac{1}{2}}R^{\frac{1}{2}}I \quad (3.25)$$

Definuje se  $Z_n = R^{-\frac{1}{2}}ZR^{-\frac{1}{2}}$ , což můžeme nazvat normalizovanou impedanční maticí a nahradíme ji rovnicí:

$$a + b = Z_n(a - b) \quad (3.26)$$

Po úpravě dostaneme:

$$b = (Z_n + 1)^{-1}(Z_n - 1)a \quad (3.27)$$

Nebo:

$$S = (Z_n + 1)^{-1}(Z_n - 1) \quad (3.28)$$

Kde  $Z_n$  je normalizovaná impedance matice a  $1$  je identifikátor matice.

### 3.5 Vyjádření dvou portového zapojení

Většina prvků, se kterými se můžeme setkat, jsou dvou portové. I prvky, které nejsou přesně dvou portové, jako tranzistory, se velmi často charakterizují dvou portovými parametry. Uvažujme následující příklad: [10]

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Předpokládejme, že výstup je zakončen jiným odporem než normalizačním. Zakončení na koeficient odrazu  $\Gamma_L$ , takže:

$$a_2 = \Gamma_L b_2 \quad (3.30)$$

Dosazením (3.30) do rovnice (3.29) dostaneme:

$$\frac{a_2}{b_2} = \Gamma_{in} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1-S_{22}\Gamma_L} \quad (3.31)$$

Kde  $\Gamma_{in}$  je vstupní koeficient odrazu. Podobně výstupní koeficient odrazu  $\Gamma_{out}$  je:

$$\Gamma_{out} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_S}{1-S_{22}\Gamma_S} \quad (3.31)$$

Kde  $\Gamma_S$  je koeficient odrazu zdroje.

Výkonový poměr je následně:

$$G_T = \frac{|S_{21}|^2(1-|\Gamma_S|^2)(1-|\Gamma_L|^2)}{|(1-S_{11}\Gamma_S)-(1-S_{22}\Gamma_L-S_{12}S_{21}\Gamma_S\Gamma_L)|} \quad (3.31)$$

Pokud bude  $\Gamma_S = \Gamma_L = 0$ , tak podle očekávání bude  $G_T = |S_{21}|^2$ .

## 4 ROZDĚLENÍ PRODUKTŮ NA TRHU

Detektory vedení lze rozdělit podle několika kritérií:

- cena,
- způsob využití,
- způsob detekce.

### Cena

Hlavním kritériem, podle kterého se především zákazník řídí, je cena. V oblasti detektorů lze produkty pořídit již za pár set korun. Tyto levné detektory však nemají žádnou pokročilou metodu zobrazování výsledků a lokalizaci vedení indikují pouze pomocí světelní diody, nebo pomocí zvukových signálů. Dražší přístroje již umožňují přesnější detekci zejména proto, že vnitřní SW vyhodnocuje naměřené hodnoty a tyto pak přehledně zobrazí na displeji. Na displeji též může být zobrazeno, jakým směrem by měla lokalizace dále pokračovat, popřípadě jakým směrem posunout detektor, aby se nacházel přímo nad vedením. Nejdražší kategorie produktů pak již může obsahovat další pokročilé funkce, jako GPS, Bluetooth či USB. Tyto zařízení poté umožňují připojení detektoru k počítači a pozdější zpracování naměřených dat.

### Způsob využití

Dále by se zákazník měl řídit podle toho, k jaké aplikaci bude daný přístroj využívat. Například domácí uživatel nemusí vyhledávat drahé produkty, ale může se zaměřit na nejlevnější produkty. Je však otázkou, jestli tyto nejlevnější produkty budou mít pro domácího uživatele dostatečnou přesnost. Pokud však domácí uživatel nepotřebuje detektor vedení mít neustále k dispozici, je výhodnější variantou si tento detektor vypůjčit. Uživateli pak odpadnou starosti s údržbou a pro vlastní detekci využije mnohem kvalitnější a přesnější přístroj. U profesionálních pracovníků by měl výběr probíhat s ohledem na to, jaké druhy vedení bude vyhledávat a v jakém prostředí toto vedení bude.

### Způsoby detekce

Posledním kritériem výběru detektoru, je jaký princip tento detektor k lokalizaci používá. Nejlevnější detektory využívají zejména principu detektoru kovů. Tento princip však není pro lokalizaci nejpřesnější a neumožňuje vyhledat konkrétní vedení. Dražší přístroje pak většinou kombinují princip detektoru kovů a vyhledáním frekvence 50 Hz,



což umožní přesněji vyhledat vedení pod napětím. Některé detektory pak umožňují připojení externího generátoru na vedení, což dále velmi zpřesní lokalizaci.

#### 4.1 Rešerše produktů

##### Detektor kovu a elektrického vedení MD-12



Obr. 13. Detektor MD-12 [11]

Tento detektor je zástupce nejlevnějších zařízení. Lokalizaci vedení indikuje pomocí světelné diody. Má nastavitelnou citlivost.

Tab. 2. Parametry detektoru MD-12

Napájení	1x9V
Hloubka rozpoznání kovu	90 mm
Hloubka rozpoznání napětí	30 mm
Testovací napětí	90-250 V / 50-60 Hz
Hmotnost	119 g
Cena	165 Kč

##### Detektor kovu a vedení STANLEY S100



Obr. 14. Detektor Stanley S100 [12]

Pokročilejší detektor, který využívá pro indikaci lokalizovaného vedení optické a zvukové signály. Především zvuková detekce může pomoci při přesnější lokalizaci vedení.

Tab. 3. Parametry detektoru Stanley S100

Napájení	1x9V
Hloubka rozpoznání kovu a dřeva	19 mm
Hloubka rozpoznání napětí	51 mm
Indikace	Optická/Zvuková
Cena	288 Kč

**Detektor kovu a vedení STANLEY s LCD**

Obr. 15. Detektor Stanley s LCD [12]

Pokročilý detektor, který umožňuje určit hloubku hledaného vedení. Pro signalizaci je použit LCD displej, který umožní přesnější lokalizaci. Dále detektor umí určit lokalizovaný materiál.

Tab. 4. Parametry detektoru Stanley s LCD

Napájení	1x9V
Hloubka rozpoznání kovu	75 mm
Hloubka rozpoznání vedení pod napětím	50 mm
Přesnost určení hloubky železných kovů	$\pm 7$ mm
Přesnost určení hloubky neželezných kovů	$\pm 10$ mm
Indikace	LCD displej
Cena	1 224 Kč

**Multimetr se zkoušečkou vedení Volcraft LSG-4 DMM**



Obr. 16. Detektor Volcraft LSG-4 DMM [13]

Přístroj se skládá z akustického generátoru, který moduluje vysokofrekvenční signál na testované vedení a z induktivního přijímače, jenž dokáže vyhledat vedení až do hloubky 15 cm. Pokud je vedení pod napětím, lze využít samostatné sondy bez použití generátoru. Výhodou tohoto přístroje je i to, že v sobě integruje i multimetr, což je výhodné zejména pro montážní techniky. Nevýhodou oproti předešlým přístrojům je pak to, že neobsahuje detektor kovů, takže lze vyhledat pouze elektrické vedení.

Tab. 5. Parametry detektoru Volcraft LSG-4 DMM

Napájení	2x9V
Maximální délka hledaného vedení	400 m
Indikace	LCD displej/Zvuk
Cena	2 190 Kč

### Detektor vedení 801K Premium



Obr. 17. Detektor 801K Premium [13]

Generátor pracuje na frekvenci 1 kHz s napětím 4,5 V a výstupním výkonem +7 dBm. Pro připojení k izolovanému vedení lze využít krokosvork s hřebíkovými polštářky.

Tab. 6. Parametry detektoru 801K Premium

Napájení	2x9V
Maximální délka vedení	10 km
Indikace	LCD displej
Cena	5 190 Kč

### Detektor Fluke 2042



Obr. 18. Detektor Fluke 2042 [14]

Tento detektor je profesionální přístroj k lokalizaci vedení. Je vhodný k lokalizaci ve zdech i pod zemí. Generátor vysílá do vedení amplitudově modulované signály s frekvencí 125 kHz, které vytvářejí okolo testovaných vodičů elektromagnetické pole. Toto pole poté vyhodnotí indukční snímač. Snímač využívá tři snímací cívky pro co nejpřesnější lokalizování polohy. Generátor lze zapojit i na vedení pod napětím a to až do 300 V. K zařízení lze též přikoupit druhý generátor, kterému se přiřadí jiné identifikační číslo, a pak je možné přesně vyhledat přerušené vedení.

Tab. 7. Parametry detektoru Fluke 2042

Napájení	1x9V 6xAA
Lokalizace vedení až do hloubky	2,5m
Indikace	LCD displej/LCD displej
Cena	25 490 Kč

### Detektor EZiCAT i750xf



Obr. 19. Detektor EZiCAT i750xf [14]

Je to jeden z nejpokročilejších detektorů, který nabízí zaznamenání trasy s pomocí GPS. Detektor může pracovat ve třech režimech. V prvním režimu hledá frekvence 50 nebo 60 Hz. V druhém režimu využívá vzdálených rádiových signálů na frekvencích od 15 do 60 kHz. Ve třetím režimu poté využívá vlastní generátor signálu s frekvencemi 8 a 33 kHz. Lokalizace vedení je možná do hloubky až 3m s použitím módu pro hledání 50 a 60 Hz. Při použití generátoru záleží hloubka lokalizace na výkonu daného generátoru. Tento detektor je primárně určen především pro detekci inženýrských sítí.

Tab. 8. Parametry detektoru EZiCAT i750xf

Napájení	6x AA
Lokalizace vedení až do hloubky	3m
Paměť	64 Mb
Indikace	LCD displej
Cena	35 099 Kč

**Signálový generátor EZiTEX t300xf**

Obr. 20. Generátor EZiTEX t300xf [12]

Signálový generátor slouží ke spolupráci s detektorem EZiCAT i750xf. Detektor lze s vedením propojit následujícími způsoby. Za prvé se může využít přímé vodivé spojení, za druhé vazebně, a to jako položený generátor nad vedením a za třetí lze využít vazby s užitím kleští.

Tab. 9. Parametry generátoru EZiTEX t300xf

Napájení	4 x LR20
Frekvence	8,192 kHz, 32,768 kHz, 512 Hz, 640 Hz
Počet výkonnostních úrovní	4
Dodaný výkon pomocí indukce	až 1 W
Dodaný výkon pomocí přímého spojení	až 3 W
Krytí	IP 65 / IP 54
Cena	38 099 Kč

## 5 SEZNÁMENÍ SE S PROGRAMEM WIPL-D

WIPL-D je program, který umožňuje rychlou a přesnou analýzu metalických, dielektrických a magnetických struktur jako antény, pasivní mikrovlnné obvody atd. Program též umožňuje definovat geometrii jakékoliv struktury pomocí kombinace drátů, plátů a pomocí materiálu předmětů. [15]

Výstupem programu WIPL-D může být rozložení proudu na dané struktuře, vyzařovací diagram, rozložení blízkého pole, admitance, impedance a s-parametry. Program též umožňuje využití 2-D a 3-D grafických výstupů.

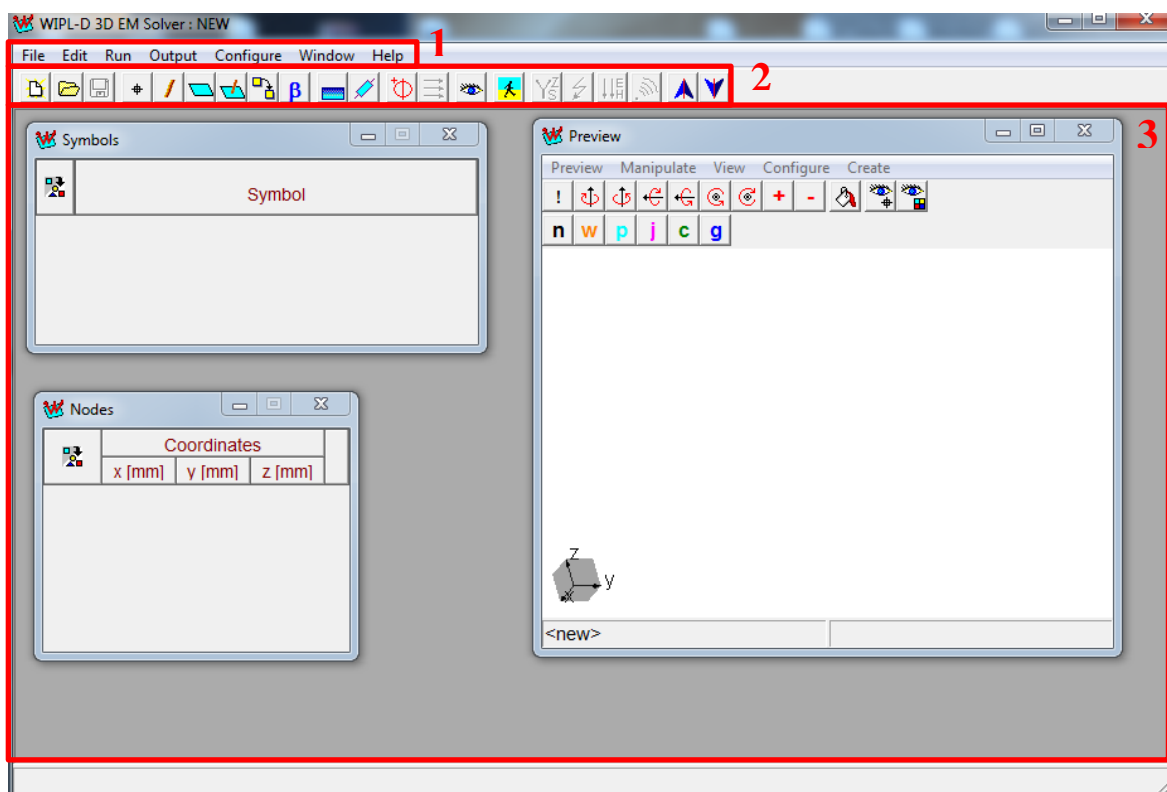
### 5.1 Základní vlastnosti

- Kompozitní struktura je charakterizována pomocí odpovídajících povrchových proudů na kovových částech a odpovídajících elektrických a magnetických proudů na dielektrických částech. Takto lze počítat se ztrátami v materiálech s vysokou komplexní permeabilitou a permitivitou.
- Koncentrované a distribuované zatížení může být aplikované na kovové konstrukce, čímž se můžou simulovat koncové prvky, ztráty vzniklé skin efektem, drsnost povrchu atd.
- Flexibilní geometrické modelování zahrnuje válcové a kuželové vodiče, čtyřstranné desky, které mohou reprezentovat kovové povrchy, ztrátové a bezztrátové povrchy, dielektrické a magnetické povrchy. Dále také uzly vodičů a desek a výčnělky, takže skoro všechny konečné kompozitní struktury mohou být namodelovány.
- Přesné proudové modelování je založeno na polynomicke aproximaci ve spojení s Galerkinovou metodou, aplikované na integrální rovnice, což vede k přesné a účinné metodě.
- Jsou k dispozici různé grafické možnosti jako překrývání 2-D grafů z různých objektů, nebo zabarvení a stínování 3-D struktur, což umožňuje vytvořit názorné příklady.

### 5.2 Grafické rozhraní

Grafické rozhraní se skládá ze tří základních částí. První částí je textové menu, které obsahuje všechny funkce programu. Druhá část se skládá z grafických ikon. Tyto ikony jsou však pouze pro zrychlení práce a všechny tyto funkce lze též nalézt i v textovém

menu. Třetí částí je pracovní plocha, na které se zobrazují všechny potřebné informace. Tyto tři části jsou vyznačeny v následujícím obrázku.



Obr. 21. Základní rozhraní programu WIPL-D

V pracovní ploše lze vidět okno preview. V tomto okně se graficky zobrazují vytvořené struktury, které si v daném okně můžeme libovolně natáčet, přibližovat a zobrazovat popisky jednotlivých prvků. Nelze zde však model vytvářet, ani upravovat. Vytvoření a úpravy modelu se musí provádět pomocí textové editace uzlů, vedení, plátů atd.

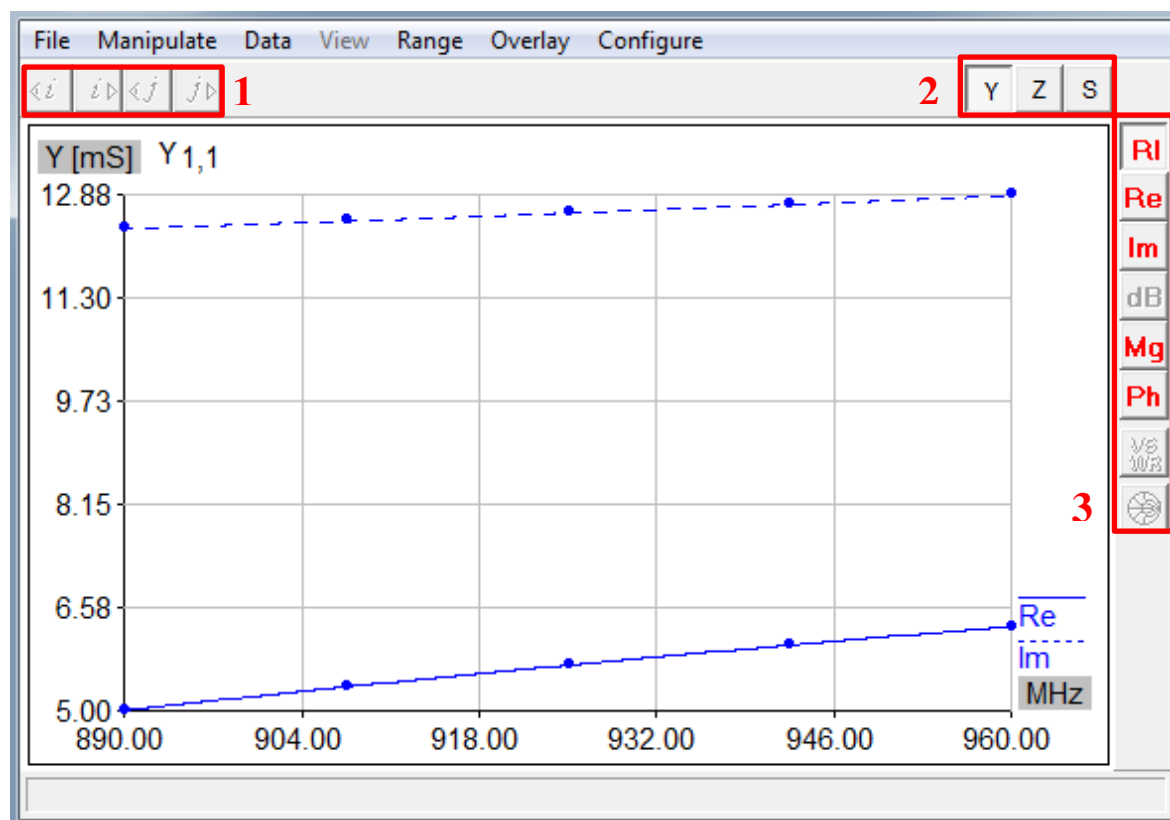
Po vytvoření modelu lze provést simulaci. Simulace se spustí stiskem ikony 1. Po provedení simulace je možné zobrazit výsledky pomocí ikon 2. Výsledky se poté zobrazí v novém okně.



Obr. 22. Lišta ikon v programu WIPL-D

Okno výsledků vypadá následovně:





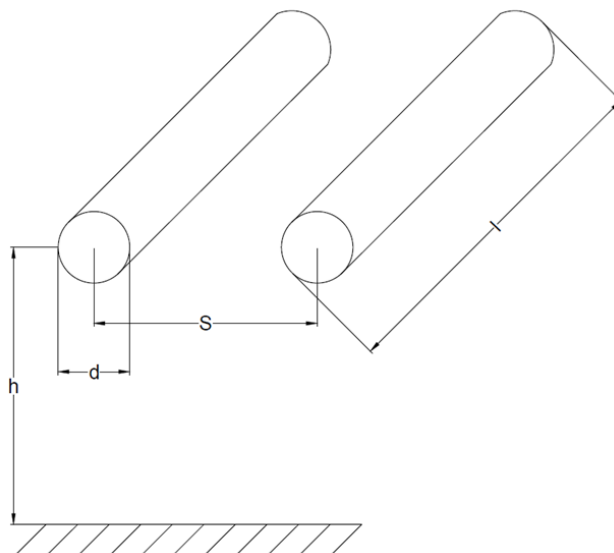
Obr. 23. Okno s výsledky v programu WIPL-D

V tomto okně lze pomocí ikon 1 zvolit, mezi jakými porty se mají hodnoty zobrazovat. Pomocí ikon 2 lze zvolit parametry Y, Z a S a pomocí ikon 3 se zvolí hodnoty jednotlivých parametrů. Nevýhodou však je, že zde není možné najetím myši na výsledný graf zobrazit číselné výsledky a lze tedy přesné hodnoty pouze odhadovat. Analogicky se poté ovládají i další okna s výsledky.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 VÝPOČET VÁZANÉHO VEDENÍ TVOŘENÉHO 2 VODIČI KRUHOVÉHO PRŮŘEZU

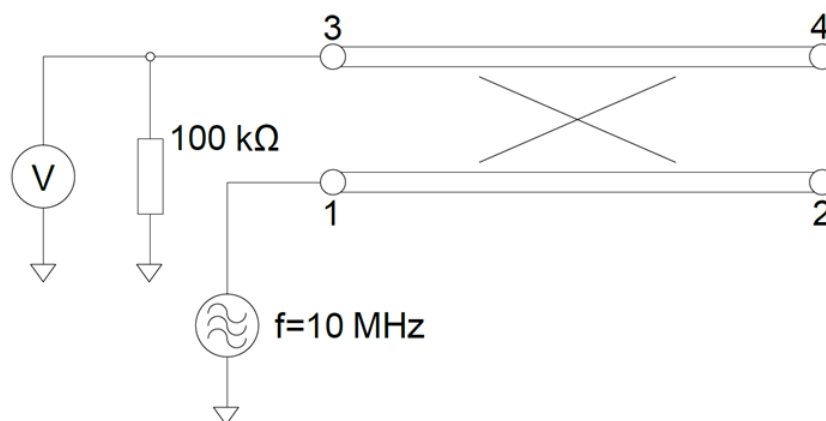
Pro výpočet vázaného vedení se využije následujícího příkladu:



Obr. 24. Rozměry vázaného vedení

Kde  $h = 50 \text{ mm}$ ,  $d = 1 \text{ mm}$ ,  $S = 10 \text{ mm}$ ,  $l = 200 \text{ mm}$ .

Podle knihy [16] se nakreslí náhradní schéma:

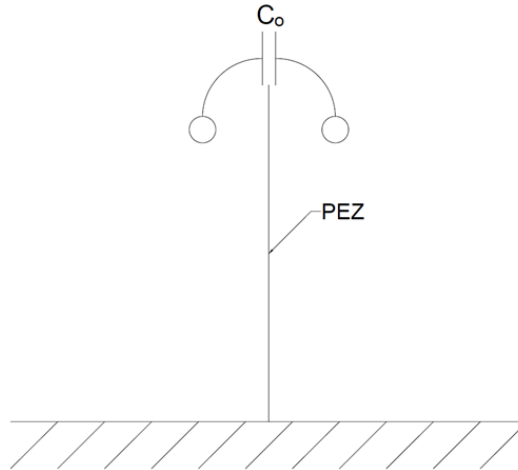
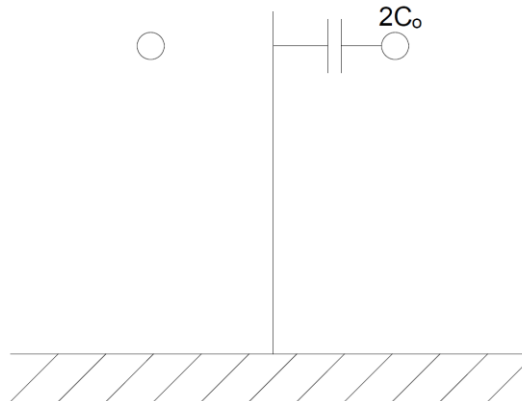


Obr. 25. Náhradní schéma vázaného vedení

Obvod se budí na svorce 1 ideálním napěťovým zdrojem. Signál se poté odebírá na svorce 3. Buzený úsek 1 a 2, tak i úsek 3 a 4 jsou zapojeny naprázdno. Z toho vyplývá, že vazba mezi vodiči je dominantně pouze kapacitní, protože  $I_1$  a  $I_2$  jsou na vedeních velmi malé. Vázané vedení se poté popíše maticí  $[S]_{\text{cline4}}$ .

$$[S]_{cline4} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{21} & S_{42} & S_{41} \\ S_{21} & S_{11} & S_{41} & S_{42} \\ S_{41} & S_{41} & S_{11} & S_{21} \\ S_{41} & S_{42} & S_{21} & S_{11} \end{bmatrix}$$

Hodnoty  $S_{xx}$  určíme podle knihy [16]. Pro výpočet s-parametrů se však musí nejdříve zjistit hodnoty impedance a kapacity. Kapacity se musí počítat pro sudý a lichý uzel, tedy s označením  $C_o$  a  $C_e$ .

Obr. 26. Schéma kapacity  $C_o$ Obr. 27. Schéma kapacity  $2 C_o$ 

$$C_o = \frac{\pi \varepsilon}{\ln\left(\frac{S}{r}\right)} \quad (4.1)$$

$C_o$  vyjde 9,285 pF. Podle simulačního programu ANSYS 11 poté vyjde  $C_o$  9,127 pF. Ve stejném programu se dále vypočítá hodnota  $C_e$ , která vyjde 5,871 pF. Pomocí těchto hodnot se poté vypočítají impedance  $Z_{C_o}$  a  $Z_{C_e}$ .

$$Z_{C_o} = \frac{1}{C \times C_o} \quad (4.2)$$

Pomocí rovnice (4.2) vyjdou hodnoty  $Z_{C_o} = 359 \, \Omega$  a  $Z_{C_e} = 567,8 \, \Omega$ .

Nyní z knihy [16] použijeme rovnice na výpočet s-parametrů:

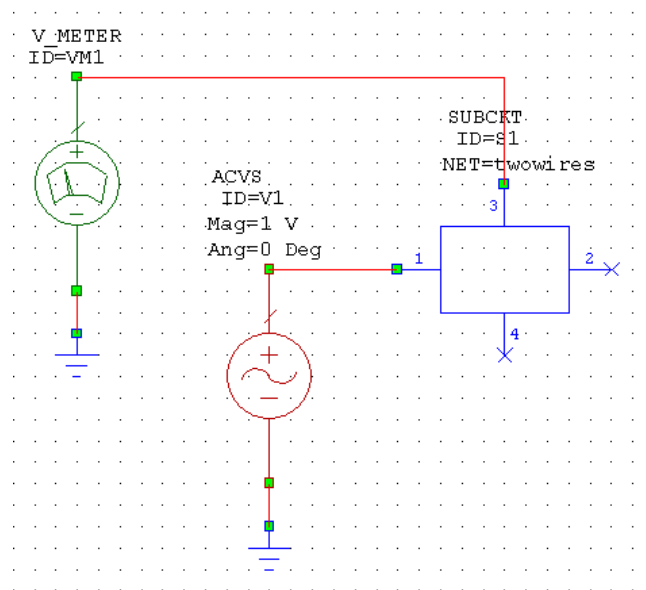
$$S_{22} = \frac{1}{2} \left[ \frac{j \left( \frac{Z_{Ce}}{Z_0} - \frac{Z_0}{Z_{Ce}} \right) \sin(2\pi l / \lambda)}{2 \cos(2\pi l / \lambda) + j \left( \frac{Z_{Ce}}{Z_0} - \frac{Z_0}{Z_{Ce}} \right) \sin(2\pi l / \lambda)} + \frac{j \left( \frac{Z_{Co}}{Z_0} - \frac{Z_0}{Z_{Co}} \right) \sin(2\pi l / \lambda)}{2 \cos(2\pi l / \lambda) + j \left( \frac{Z_{Co}}{Z_0} - \frac{Z_0}{Z_{Co}} \right) \sin(2\pi l / \lambda)} \right] \quad (4.3)$$

$$S_{21} = \left[ \frac{1}{2 \cos(2\pi l / \lambda) + j \left( \frac{Z_{Ce}}{Z_0} - \frac{Z_0}{Z_{Ce}} \right) \sin(2\pi l / \lambda)} + \frac{1}{2 \cos(2\pi l / \lambda) + j \left( \frac{Z_{Co}}{Z_0} - \frac{Z_0}{Z_{Co}} \right) \sin(2\pi l / \lambda)} \right] \quad (4.4)$$

$$S_{42} = \frac{1}{2} \left[ \frac{j \left( \frac{Z_{Ce}}{Z_0} - \frac{Z_0}{Z_{Ce}} \right) \sin(2\pi l / \lambda)}{2 \cos(2\pi l / \lambda) + j \left( \frac{Z_{Ce}}{Z_0} - \frac{Z_0}{Z_{Ce}} \right) \sin(2\pi l / \lambda)} - \frac{j \left( \frac{Z_{Co}}{Z_0} - \frac{Z_0}{Z_{Co}} \right) \sin(2\pi l / \lambda)}{2 \cos(2\pi l / \lambda) + j \left( \frac{Z_{Co}}{Z_0} - \frac{Z_0}{Z_{Co}} \right) \sin(2\pi l / \lambda)} \right] \quad (4.5)$$

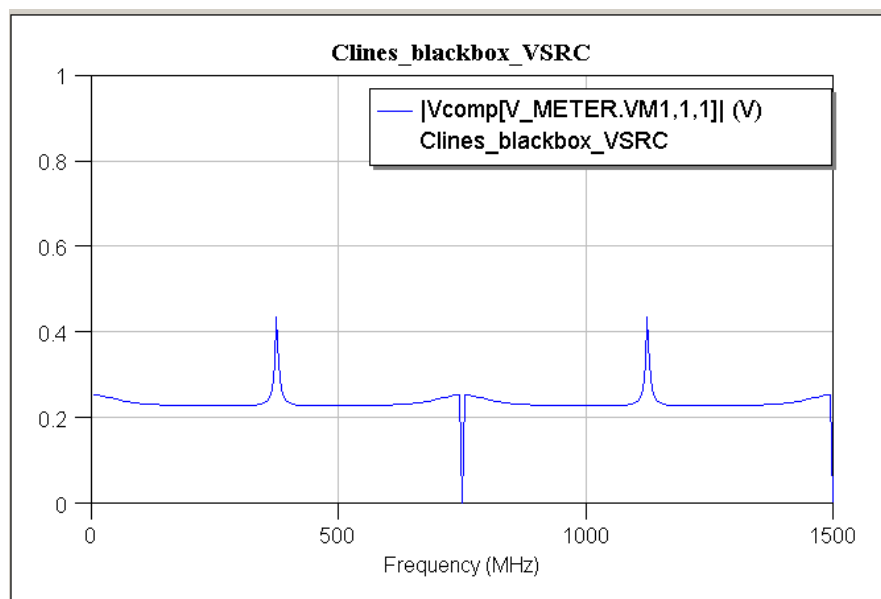
$$S_{41} = \left[ \frac{1}{2 \cos(2\pi l / \lambda) + j \left( \frac{Z_{Ce}}{Z_0} - \frac{Z_0}{Z_{Ce}} \right) \sin(2\pi l / \lambda)} - \frac{1}{2 \cos(2\pi l / \lambda) + j \left( \frac{Z_{Co}}{Z_0} - \frac{Z_0}{Z_{Co}} \right) \sin(2\pi l / \lambda)} \right] \quad (4.6)$$

Pomocí programu MATLAB se vypočítají tyto rovnice a matice  $[S]_{cline4}$ . Výsledek matice se poté použije v programu Microwave Office. Obvod v tomto programu vypadá následovně:



Obr. 28. Schéma zapojení v programu Microwave Office

Po provedení simulace v programu Microwave Office, vyjdou následující hodnoty:



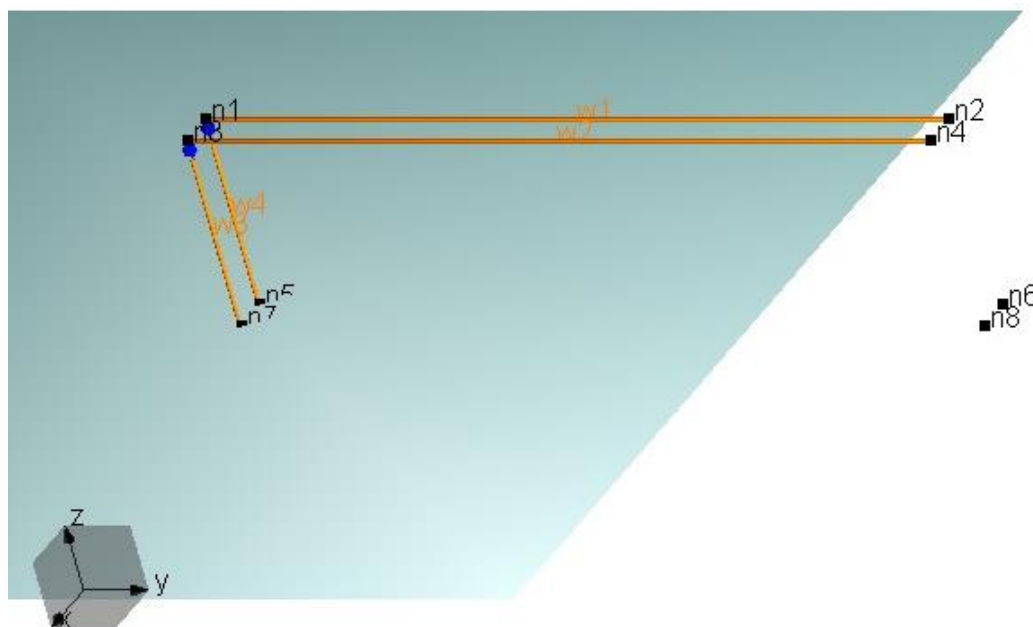
Obr. 29. Výsledek v programu Microwave Office

Napěťový přenos ze svorky 1 na svorku 3 je přibližně  $A_u = 0,22$ , tj. -13,15 dB.

Zdrojové soubory z MATLABu a Microwave Office jsou přiloženy k diplomové práci.

## 7 SIMULACE V PROGRAMU WIPL-D

Parametry simulace byly zvoleny tak, aby co nejvíce odpovídaly počítanému příkladu. Grafické znázornění simulovaného obvodu vypadá následovně:



Obr. 30. Grafické znázornění žesného obvodu

Jednotlivé uzly byly zvoleny takto:

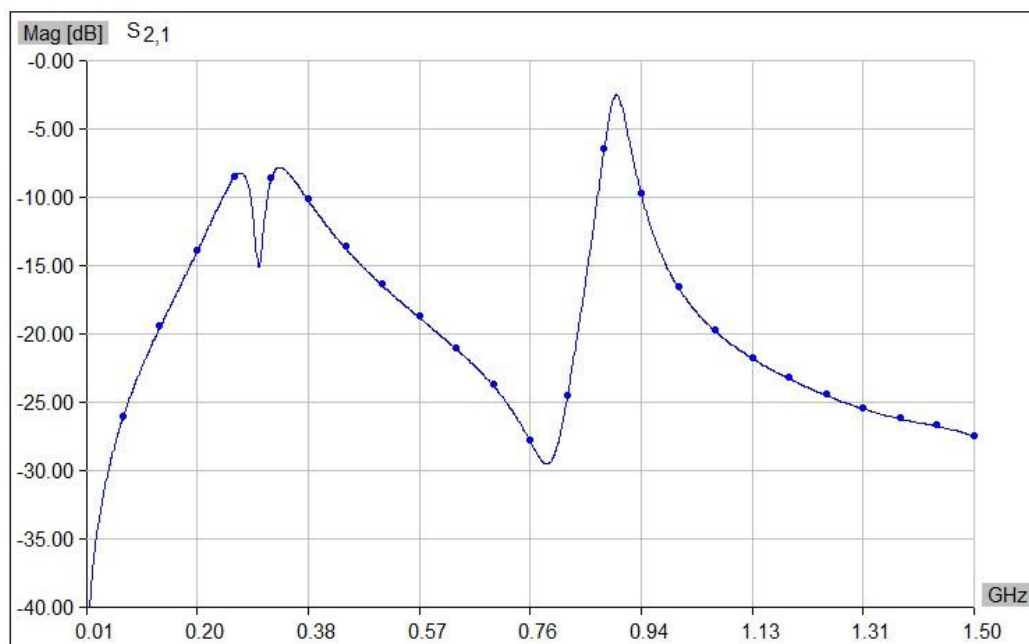
Tab. 10. Rozmístění uzlových bodů

	x [mm]	y [mm]	z [mm]
1	0	0	50
2	0	200	50
3	10	0	50
4	10	200	50
5	0	0	0
6	0	200	0
7	10	0	0
8	10	200	0

Generátor 1 je vložen mezi uzly 3 a 7, generátor 2 pak mezi uzly 1 a 5. Napětí je nastaveno na hodnotu 1 V. Pokud není generátor aktivní, pracuje v zapojení jako voltmetr. Vedení je vloženo mezi příslušné uzly a průměr tohoto vedení je nastaven na 0,5 mm.

Frekvence simulace byla zvolena od 0,01 GHz do 1,5 GHz. Výrazně větší frekvenční rozsah simulace nešel nastavit kvůli licenčnímu omezení programu.

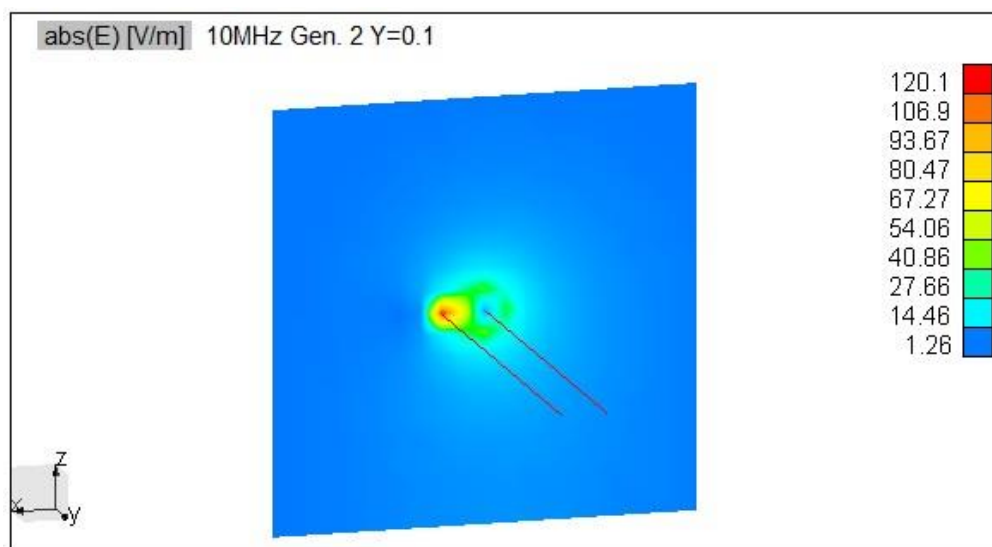
Výsledky simulace s-parametrů mezi uzly 2 a 1 jsou zobrazeny na dalším obrázku.



Obr. 31. S-parametry řešeného obvodu mezi uzli 1 a 2

Z výsledků vyplývá, že napěťový přenos mezi porty 2 a 1 je nejnižší při nízké frekvenci 10 MHz (- 40 dB), a naopak nejvyšší při frekvenci zhruba 0,9 GHz (- 2,5 dB). Jak je však z obrázku patrné, napěťový přenos strmě stoupá od nejnižších frekvencí až zhruba do frekvence 0,25 GHz, kdy je výkon asi - 8 dB. Od této frekvence poté výkon znovu klesá, a to do frekvence asi 0,79 GHz s výkonem - 30 dB. Následuje další strmý nárůst až do frekvence 0,9 GHz a napěťovým přenosem - 2,5 dB. Poté však už výkon pouze klesá.

Pole okolo vodičů je zobrazeno na obrázku 32:



Obr. 32. Výsledné pole kolem vodičů



Nevýhoda programu je však v tom, že neumožňuje vložit do obvodu měřicí zařízení. Měřicím zařízením je poté generátor, který není v danou chvíli aktivní. To znamená, že se generátory musí aktivovat postupně, což může zkreslit výsledky.

### **7.1 Porovnání výsledků simulace s vypočtenými hodnotami.**

Při porovnání výsledků numerické a simulační metody dojdeme k závěru, že se velmi liší. V námi vypočítaném příkladu je výkon téměř stabilní při všech frekvencích a dochází pouze k malým výkyvům. Naopak u simulace lze vidět, že výkon není vůbec stabilní jako u vypočítaného příkladu a naopak je velmi závislý na frekvenci. Z teoretického hlediska by poté bylo nejlepší použít k lokalizaci vedení pomocí kapacitní vazby frekvence 0,25 a 0,9 GHz. Z praktického hlediska by však byly měřicí zařízení zbytečně drahá a proto se v praxi používá nižších frekvencí a vyšší útlum se nahrazuje vyšším výkonem generátoru.

## 8 POUŽITÉ PŘÍSTROJE PŘI MĚŘENÍ

V následující tabulce jsou uvedeny všechny použité přístroje při měření:

Tab. 11. Použité přístroje

Generátor signálu	ROHDE & SCHWARZ SM300
Generátor signálu	WHG
Spektrální analyzátor	ROHDE & SCHWARZ FSH3
Detektor odposlechů	CPM - 700
Sonda	ROHDE& SCHWARZ HZ-11 Sphere 3,6 cm

### ROHDE & SCHWARZ SM300

Jedná se o generátor signálu, který je přesný, výkonný a spolehlivý. Generátor vytváří velmi přesný výstupní signál, který nijak nekolísá a nemá cizí rušivé šumy. V měření jsem jej využil pro generování přesné frekvence.



Obr. 33. ROHDE & SCHWARZ SM300 [17]

Technické parametry:

- Frekvenční rozsah: 9 kHz až 3 GHz
- Modulace: AM, FM,  $\phi$ M, pulzní a I/Q
- Nízko frekvenční výstup: 20 Hz až 80 kHz
- Pracovní režim: Continuous sweep, Single sweep, Single step
- Výkonový rozsah: -123 dBm až +13 dBm
- Impedance zdroje: 50 $\Omega$

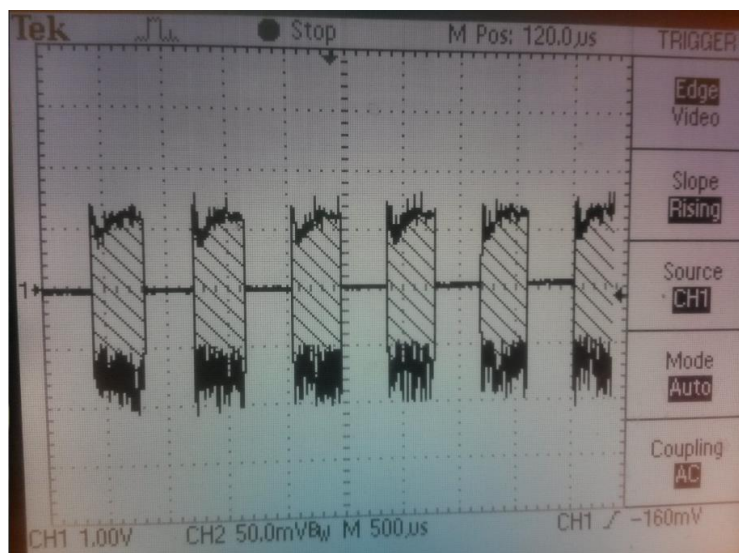
### Generátor WHG

Tento generátor je určený primárně k použití s VF detektorem RFD-5. V této kombinaci je posléze možné vyhledávat skrytá vedení.

Technické parametry:

- Akustická modulace: 1 kHz
- Výstupní napětí: 8 V
- Proudová spotřeba: 29 mA
- Antény: 1 m a 3 m

Výstupní signál generátoru WHG vypadá následovně:



Obr. 34. Signál generátoru WHG

### ROHDE & SCHWARZ FSH3

Jedná se o laboratorní spektrální analyzátor. V měření jsem tento přístroj využil k měření síly signálu na vázaném vedení společně s generátorem SM300



Obr. 35. ROHDE & SCHWARZ FSH3 [17]

Technické parametry:

- Frekvenční rozsah: 100 kHz až 3 GHz
- Rozlišení: 1kHz
- Sweep time: 1 ms až 100 s
- Vstupní impedance: 50  $\Omega$
- Celková nejistota měření: 0,5 dB

### **ROHDE& SCHWARZ HZ-11 Sphere 3,6 cm**

Tato sonda je ze sady HZ-11 a použil jsem ji k měření intenzity elektrického pole. Výhodou této sondy bylo to, že snímá celkovou složku elektrického pole a nebylo tak nutné sondu nijak natáčet.



Obr. 36. ROHDE& SCHWARZ HZ-11 Sphere 3,6 cm [18]

### **Detektor odposlechů CPM-700**

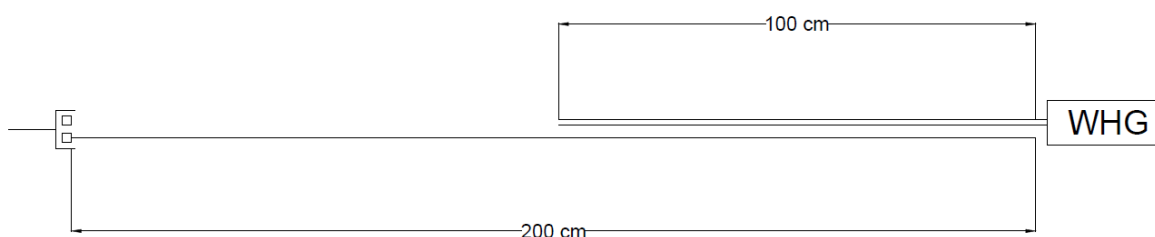
Detektor jsem využíval pro měření intenzity signálu na vázaném vedení, společně s generátorem WHG. Tento přístroj však není určený pouze k detekci vedení, ale i k celkové obranně technické prohlídce.



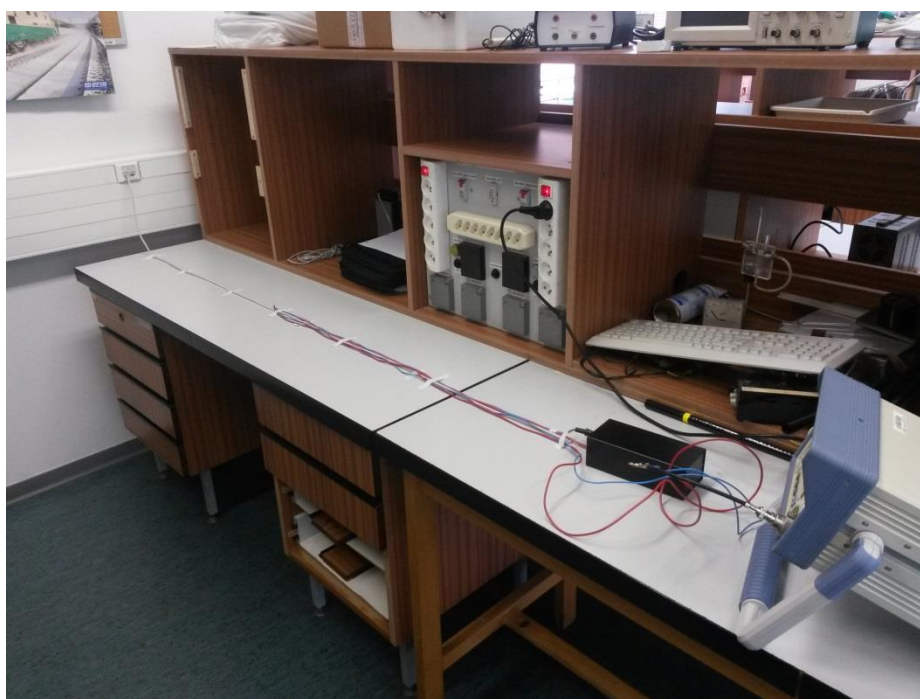
Obr. 37. Detektor odposlechů CPM-700 [19]

## 9 MĚŘENÍ VEDENÍ UTP POMOCÍ DETEKTORU CPM-700 A GENERÁTORU WHG

Měřicí soustava se skládá z detektoru CPM-700 a generátoru WHG. Na generátor je připojen kabel, který budí vedení vedle něho souběžně položené. Budící vedení má délku 1 m a vázané vedení má celkovou délku k zásuvce 2 m a poté je vedení uloženo v plastových parapetních kanálech. Po 10 m je vedení přichyceno pomocí kabelových příchytok na stropě, kde je kryté kazetovým podhledem.



Obr. 38. Schéma zapojení měření



Obr. 39. Měřicí stanoviště

### 9.1 Nastavení detektoru CPM-700

Detektor byl nastaven následujícím způsobem.

- Režim monitor

- Filtr – In
- Low gain

Se vzrůstající vzdáleností od buzeného vedení, se zvyšoval pouze gain.

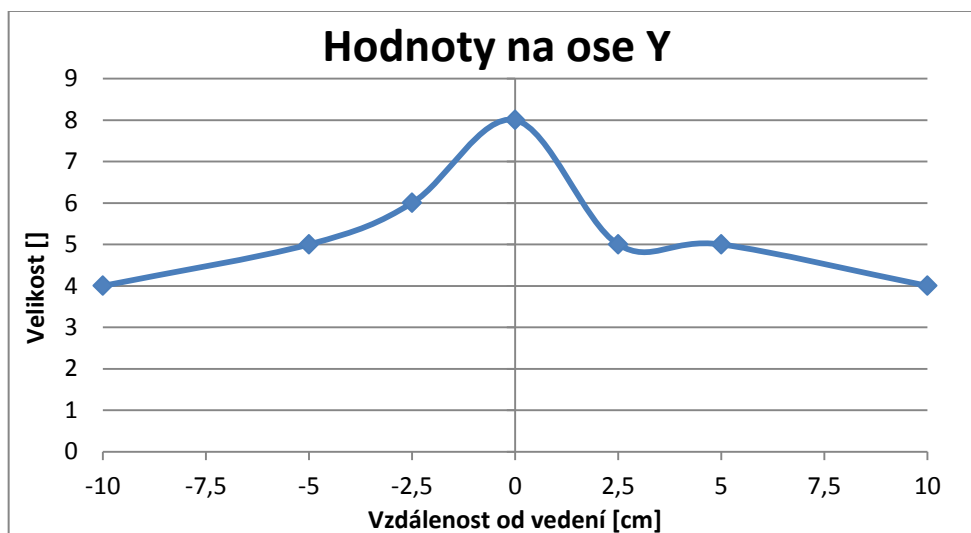
### 9.1.1 Měření na rozhraní buzeného a vázaného vedení

Gain nastaven na 40%. K odečítání hodnot bylo použito vestavného displeje a výsledky měření byly následující.

- Měření na ose Y

Tab. 12. Naměřené hodnoty  
na ose Y

Vzdálenost [cm]	Velikost[]
-10	4
-5	5
-2,5	6
0	8
2,5	5
5	5
10	4

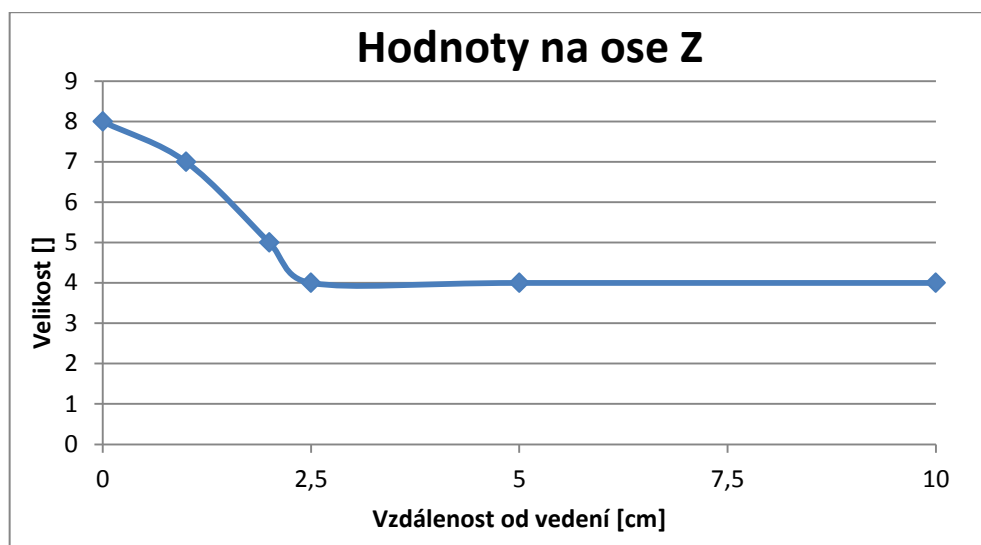


Obr. 40. Grafické znázornění intenzity signálu na ose Y

- Měření na ose Z

Tab. 13. Naměřené hodnoty  
na ose Z

Vzdálenost [cm]	Velikost[]
0	8
1	7
2	5
2,5	4
5	4
10	4



Obr. 41. Grafické znázornění intenzity signálu na ose Z

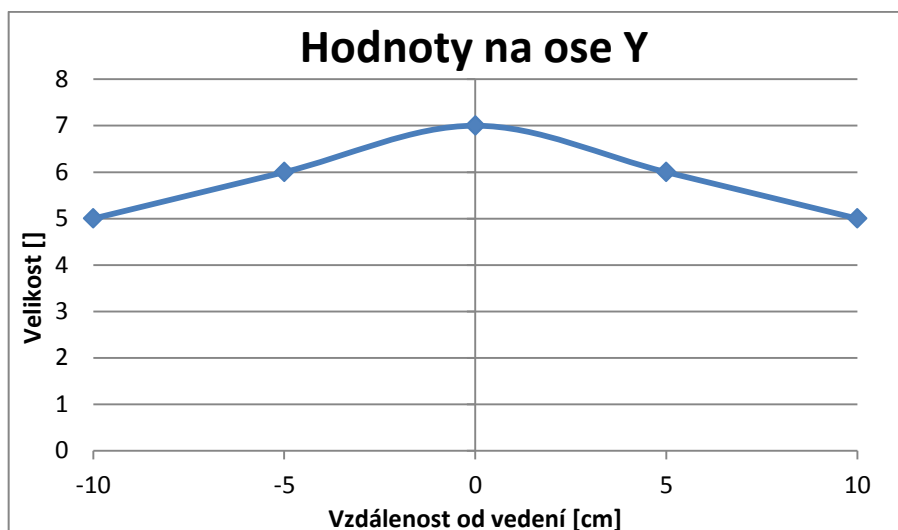
### 9.1.2 Měření 50 cm od vázaného vedení

Hodnota gain zůstala při měření na 40% a opět byl k odečtu hodnot použit displej.

- Měření na ose Y

Tab. 14. Naměřené hodnoty na  
ose Y ve vzdálenosti 50 cm

Vzdálenost [cm]	Velikost[]
-10	5
-5	6
0	7
5	6
10	5

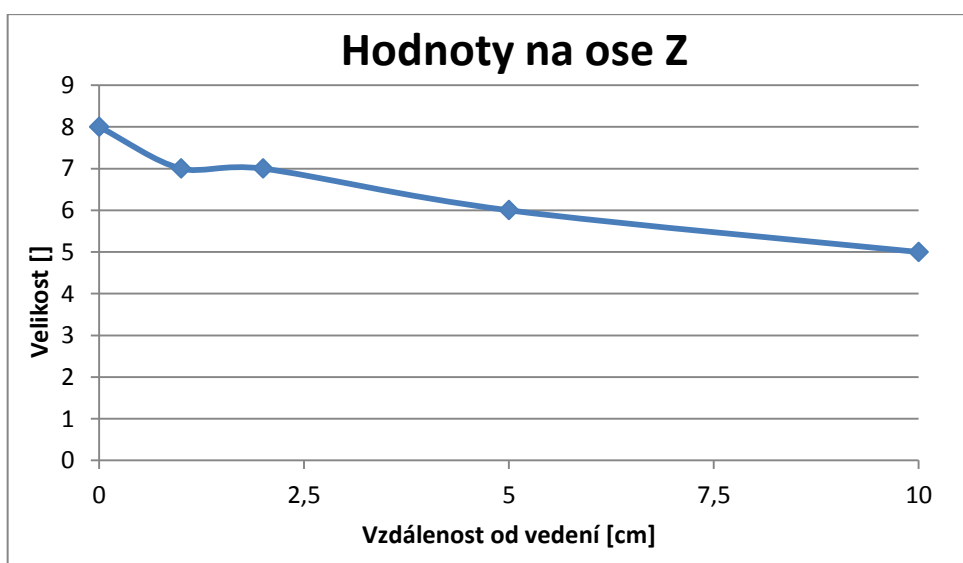


Obr. 42. Grafické znázornění intenzity signálu na ose Y ve vzdálenosti 50 cm

- Měření na ose Z

Tab. 15. Naměřené hodnoty na ose Z ve vzdálenosti 50 cm

Vzdálenost [cm]	Velikost[]
0	8
1	7
2	7
5	6
10	5



Obr. 43. Grafické znázornění intenzity signálu na ose Z ve vzdálenosti 50 cm



### 9.1.3 Měření ve větších vzdálenostech od vázaného vedení

Ve větších vzdálenostech od vedení již nejde použít displej pro odečítání hodnot, ale musí být použita akustické detekce, a tudíž je rozsah detekce vedení velmi subjektivní a těžko replikovatelný.

Tab. 16. Naměřené hodnoty na delších vzdálenostech

Vzdálenost [cm]	Hi-Gain	Gain [%]	Rozsah [cm]
150	ne	50	20
300	ne	60	20
500	ne	75	20
800	ne	100	25
500	ano	10	5
800	ano	10	10
1100	ano	15	10
1500	ano	25	10

## 9.2 Závěr měření

Při použití odečtu hodnot z displeje lze tento detektor použít pouze na malé vzdálenosti a to přibližně do 1 m od buzeného vedení. V této malé vzdálenosti lze tedy přesněji odečítat hodnoty a detekce vedení ve vzdálenosti 1m je v rozsahu asi 5 cm. Na větší vzdálenost, je pak nutné použít akustické detekce. Do 500 cm se jako nejvhodnější nastavení jevilo vypnutí Hi-Gain, a to z toho důvodu, že signál byl velice silný a tudíž i velmi hlasitý při malé hodnotě gain, což znemožnilo přesnější zaměření. Od 500 cm pak bylo možné zapnout Hi-Gain, čímž se rozsah detekce značně zlepšil, a to zhruba na 10 cm. Po zapnutí Hi-Gain se však stala velmi slyšitelnou rádiová stanice, což znesnadňovalo měření. Na vzdálenost 1500 cm bylo možno dosáhnout rozsahu detekce asi 10 cm při hodnotě gain 25%, což naznačuje, že je možné tento detektor použít na značné vzdálenosti. Při použití akustické detekce je však nutno brát ohled na měřícího pracovníka, který toto měření provádí. Především pak záleží na jeho zkušenostech a sluchu.

## 10 MĚŘENÍ VEDENÍ UTP POMOCÍ SPEKTRÁLNÍHO ANALYZÁTORU FSH3 A GENERÁTORU SM300

Měřicí soustava je stejná jako v předchozím bodě, pouze jako detektor je použit spektrální analyzátor FSH3 s elektrickou sondou HZ-11 Sphere 3,6 cm a generátor SM300.

### 10.1 Nastavení spektrálního analyzátoru FSH3

- RBW: 1 MHz
- VBW: 100 Hz
- SWT: 100 ms
- Rozsah frekvence: 1-39MHz

### 10.2 Nastavení generátoru SM300

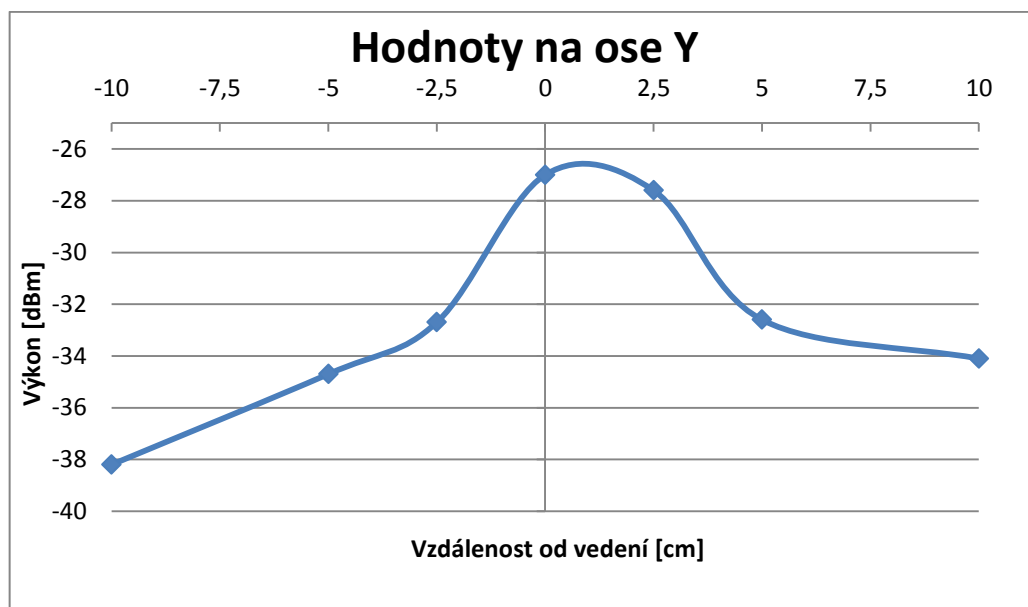
- F: 17,6 MHz
- Napětí: 980 mV

#### 10.2.1 Měření na rozsahu buzeného a vázaného vedení

- Měření na ose Y

Tab. 17. Naměřené hodnoty  
na ose Y

Vzdálenost [cm]	Výkon [dBm]
-10	-38,2
-5	-34,7
-2,5	-32,7
0	-27
2,5	-27,6
5	-32,6
10	-34,1

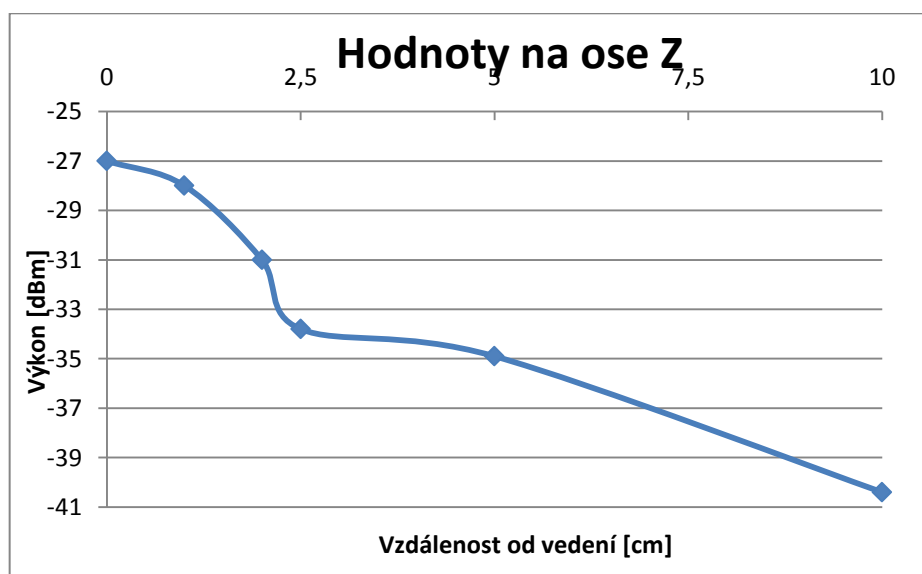


Obr. 44. Grafické znázornění intenzity signálu na ose Y

- Měření na ose Z

Tab. 18. Naměřené hodnoty na ose Z

Vzdálenost [cm]	Výkon [dBm]
0	-27
1	-28
2	-31
2,5	-33,8
5	-34,9
10	-40,4



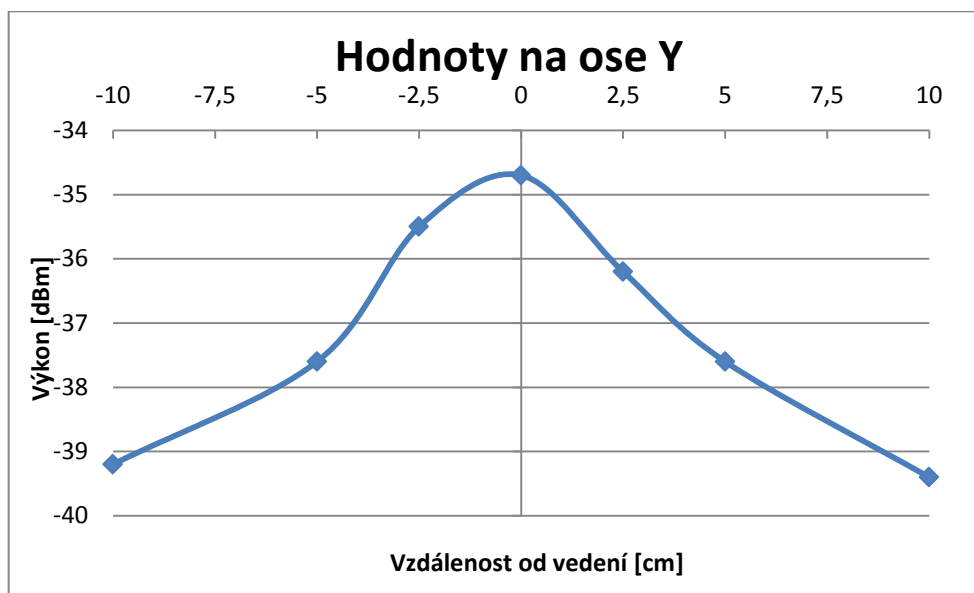
Obr. 45. Grafické znázornění intenzity signálu na ose Z

### 10.2.2 Měření 50 cm od vázaného vedení

- Měření na ose Y

Tab. 19. Naměřené hodnoty na ose  
Y ve vzdálenosti 50 cm

Vzdálenost [cm]	Výkon [dBm]
-10	-39,2
-5	-37,6
-2,5	-35,5
0	-34,7
2,5	-36,2
5	-37,6
10	-39,4

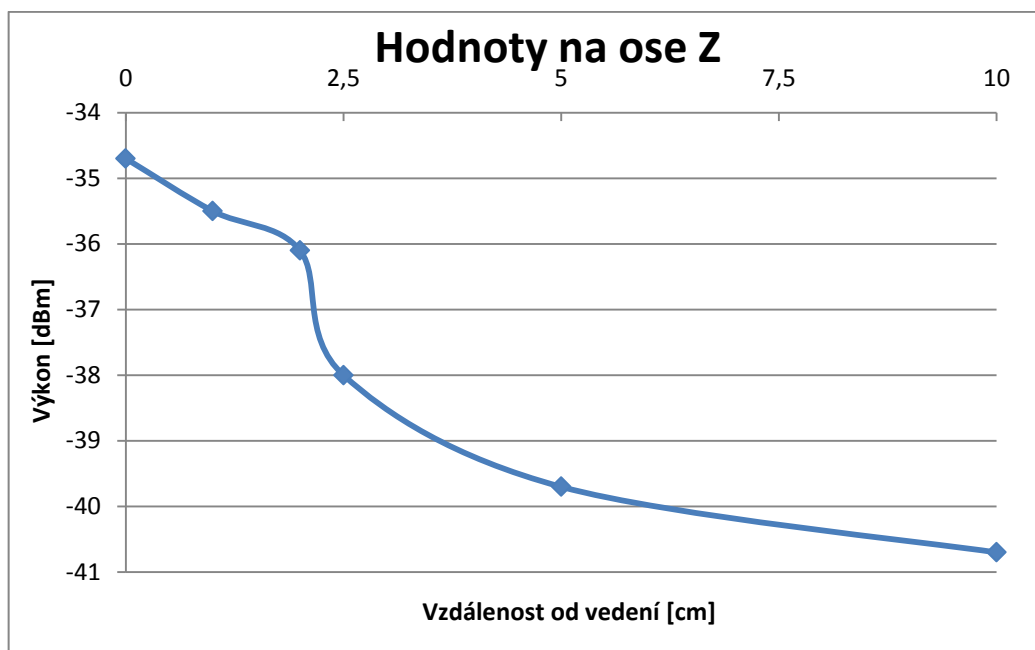


Obr. 46. Grafické znázornění intenzity signálu na ose Y ve vzdálenosti 50 cm

- Měření na ose Z

Tab. 20. Naměřené hodnoty na ose  
Z ve vzdálenosti 50 cm

Vzdálenost [cm]	Výkon [dBm]
0	-34,7
1	-35,5
2	-36,1
2,5	-38
5	-39,7
10	-40,7



Obr. 47. Grafické znázornění intenzity signálu na ose Y ve vzdálenosti 50 cm

### 10.2.3 Měření ve větších vzdálenostech od vázaného vedení

Ve větších vzdálenostech již nebyla špička tak výrazná, ale i tak se dalo celkem přesně určit položené vedení.

Tab. 21. Naměřené hodnoty na delších vzdálenostech

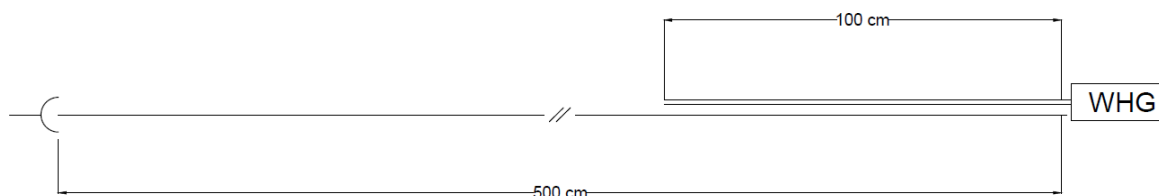
Vzdálenost [cm]	Rozsah [cm]
150	10
300	10
500	10
800	10
1100	15
1500	15

## 10.3 Závěr měření

Tento způsob měření se zdá být opět velmi efektivní. Výsledky měření rozsahu se do vzdálenosti 800 cm velmi podobají výsledkům detektoru CPM-700. Na větší vzdálenosti však již výkonová špička nebyla tak výrazná, ale i přesto bylo možno měřit ve vzdálenosti 1500 cm s přesností  $\pm 15$  cm. Výhodou tohoto měření je odečítání hodnot pouze z displeje a může ho tedy provádět i méně zkušený pracovník. Oproti CPM-700 je však použití spektrálního analyzátoru velmi nepraktické.

## 11 MĚŘENÍ VEDENÍ 230V POMOCÍ DETEKTORU CMP-700 A GENERÁTORU WHG

K měření byl použit detektor CPM-700 a generátor WHG. Budící vedení má délku 1 metru a je položeno vedle vázaného vedení, které má 5 metrů. Následně je toto vedení připojeno do zásuvky a dále je vedení uloženo v plastových parapetních kanálech.



Obr. 48. Schéma zapojení měření



Obr. 49. Přiložený generátor WHG k vedení 230 V

### 11.1 Nastavení detektoru CPM-700

- Režim monitor
- Filtr – In
- Low Gain

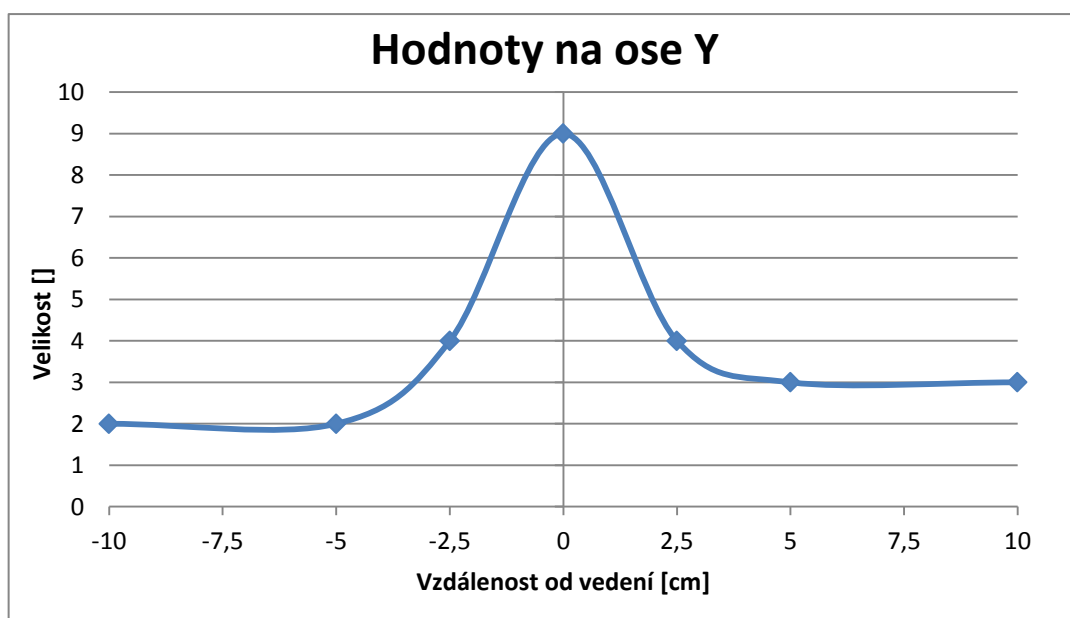
#### 11.1.1 Měření na rozhraní buzeného a vázaného vedení

Hodnota gain nastavena na 40% a k odečtu hodnot byl použit displej.

- Měření na ose Y

Tab. 22. Naměřené hodnoty na  
ose Y

Vzdálenost [cm]	Velikost []
-10	2
-5	2
-2,5	4
0	9
2,5	4
5	3
10	3

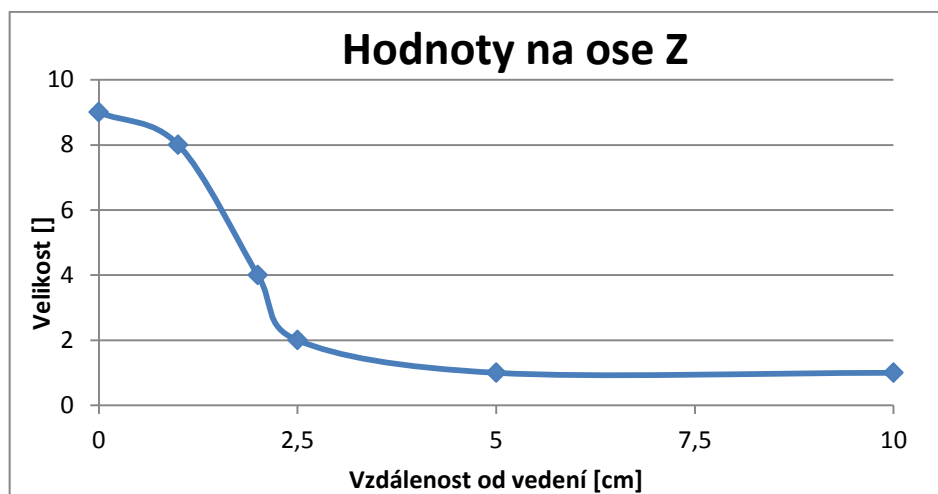


Obr. 50. Grafické znázornění intenzity signálu na ose Y

- Měření na ose Z

Tab. 23. Naměřené hodnoty  
na ose Z

Vzdálenost [cm]	Velikost []
0	9
1	8
2	4
2,5	2
5	1
10	1



Obr. 51. Grafické znázornění intenzity signálu na ose Z

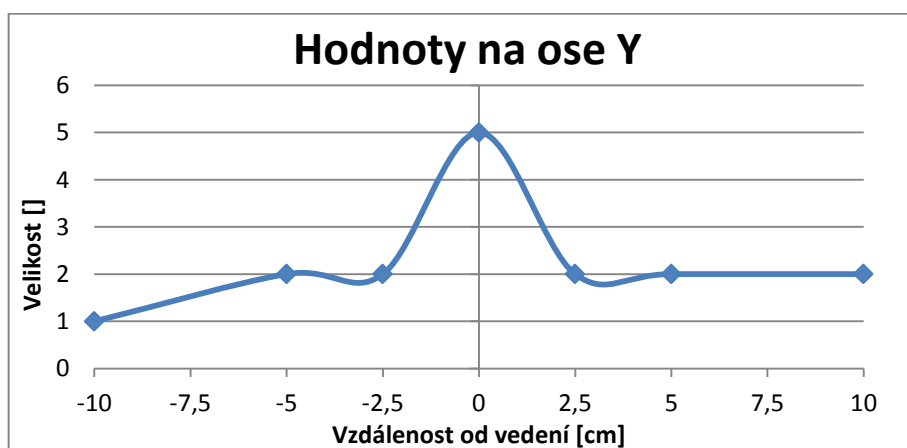
### 11.1.2 Měření 50 cm od vázaného vedení

Gain nastaveno na 50 %.

- Měření na ose Y

Tab. 24. Naměřené hodnoty na ose Y ve vzdálenosti 50 cm

Vzdálenost [cm]	Velikost []
-10	1
-5	2
-2,5	2
0	5
2,5	2
5	2
10	2



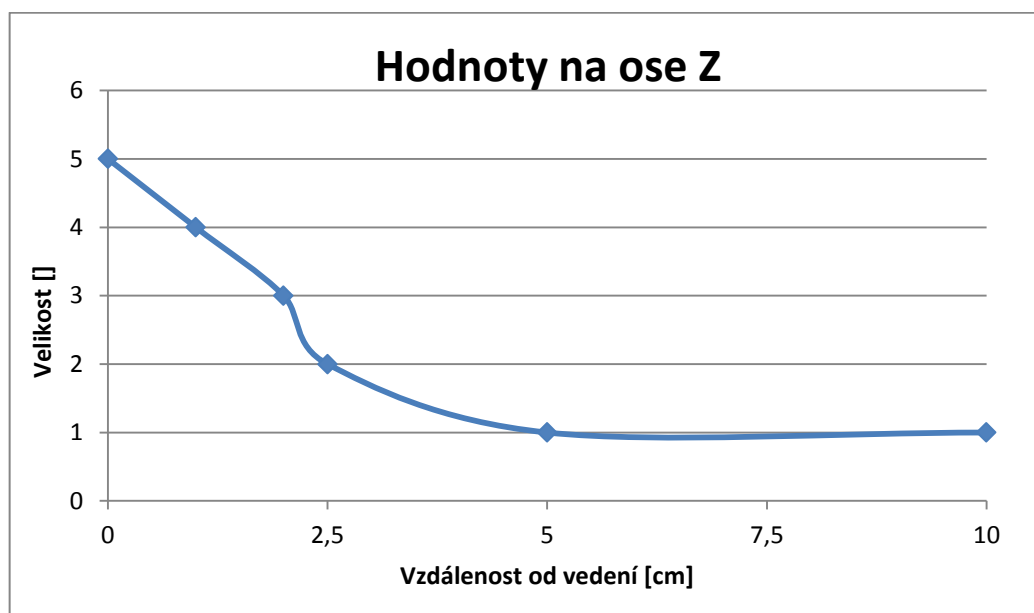
Obr. 52. Grafické znázornění intenzity signálu na ose Y ve vzdálenosti 50 cm



- Měření na ose Z

Tab. 25. Naměřené hodnoty na ose Z ve vzdálenosti 50 cm

Vzdálenost [cm]	Velikost []
0	5
1	4
2	3
2,5	2
5	1
10	1



Obr. 53. Grafické znázornění intenzity signálu na ose Z ve vzdálenosti 50 cm

### 11.1.3 Měření na větší vzdálenosti od vázaného vedení

Na větších vzdálenostech byla opět použita akustická detekce.

Tab. 26. Naměřené hodnoty na delších vzdálenostech

Vzdálenost [cm]	Hi-Gain	Gain [%]	Rozsah [cm]
150	ne	60	5
300	ne	60	5
500	ne	80	10
800	ne	80	10
1000	ne	100	15
1000	ano	40	10

## 11.2 Závěr měření

Měření vedení 230 V je přesnější než měření vedení UTP. Větší odchylka proti měření UTP nastala až při 1000 cm, kdy při Hi-Gain musel být gain nastaven na 40%. Oproti tomu měření UTP ve vzdálenosti 1100 cm vyžadovalo při Hi-Gain pouze 15%. Tato odchylka může být způsobena tím, že při 1000 cm končí vedení v plastových parapetních kanálech a dále pokračuje ve zdi, kde již není možné určit, kde tato kabeláž zatáčí a kde vede dále. Z hlediska odposlechů má však větší váhu měření sdělovacího vedení; v tomto případě UTP.

## ZÁVĚR

Jedním z hlavních cílů práce bylo vypočítat vázané vedení a provést simulaci v programu WIPL-D. Při výpočtu tohoto vedení pomocí s-parametrů bylo vypočítáno, že při frekvenčním rozsahu 0 až 1500 MHz je napět'ový přenos mezi svorkami téměř konstantní, pouze s několika špičkami okolo frekvencí 400, 750, 1100 a 1500 MHz. Průměrná hodnota napět'ového přenosu poté činí zhruba  $-13,15$  dB.

Simulace v programu WIPL-D však ukázala velmi rozdílný výsledek. Napět'ový přenos je silně závislý na frekvenci generátoru a jeho hodnota se pohybuje od  $-40$  dB až do  $-2,5$  dB. Nejvyšší napět'ový přenos poté nastává při frekvencích 0,25 a 0,9 GHz. Tyto frekvence jsou však velmi vysoké a v detektorech vedení se používají výrazně nižší frekvence, jak již bylo uvedeno v rešerši.

Praktické měření poté probíhala s již popsányi přístroji. Nejdříve jsem však zkoušel využít generátor WHG a detektor RFD-5. Tento detektor však i v klidovém stavu měřil velmi vysoké hodnoty, asi 120 dílků ze 250, i když nebyl poblíž žádný zdroj signálu. Tyto signály nešly odfiltrovat ani vestavěnými filtry a tak tento detektor nešel k lokalizaci vedení využít.

Praktická lokalizace kabelu UTP pomocí detektoru CPM-700 ukázala, že i když je tento detektor určený primárně k celkové obranně technické prohlídce, je lokalizaci metalických vedení s tímto detektorem snadná a dosahuje i celkem vysoké přesnosti. Výhoda tohoto detektoru je i v možnosti zapnutí Hi-Gain, čímž se na větších vzdálenost podstatně zpřesní lokalizace. Nevýhoda však je, že lokalizace je závislá na akustické detekci, protože optické odečítání hodnot z displeje lze použít pouze na krátké vzdálenosti. Při použití akustické detekce však velmi záleží na sluchu a zkušenostech měřícího pracovníka. Při měření se mi podařilo na delší vzdálenosti dosáhnout přesnosti asi 10 cm, ale zkušený pracovník by tuto lokalizaci dokázal určitě přesněji. Maximální vzdálenost měření pak byla 15 m a to jen z toho důvodu, že vedení nešlo dále sledovat, protože vycházelo z laboratoře do jiné patra.

Lokalizaci UTP jsem poté prováděl pomocí spektrálního analyzátoru a stabilního generátoru. I zde byla lokalizace přesná a bylo možné dosáhnout přesnosti asi 10 cm. Výhodou spektrálního analyzátoru bylo to, že hodnoty bylo možné odečítat z displeje a tudíž detekce může provést i méně zkušený pracovník. Velkou nevýhodou pak jsou velké rozměry spektrálního analyzátoru, které znemožňují jednoduchou a rychlou manipulaci.

Nakonec jsem provedl kontrolní měření s detektorem CPM-700 na silnoprudém vedení. Z tohoto měření jsem zjistil, že je lokalizace silnoprudých rozvodů přesnější a nebylo téměř nutné použít Hi-Gain. Bohužel nebylo možné vedení sledovat na více jak 10 m, protože procházelo zdí do jiné místnosti.

S profesionálními detektory vedení by zajisté bylo možné dosáhnout lepší přesnosti, protože tyto detektory dokáží automaticky vyhodnotit nejvyšší sílu signálu a také přehledně zobrazit výsledky pomocí displeje. Nejvýkonnější detektory vedení se poté nacházejí v oblasti vyhledávání inženýrských sítí. U těchto detektorů je také možné očekávat lepší propojení s nejrůznějšími geografickými informačními systémy a jednodušší přenos dat do počítače.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SCHONSTEDT INSTRUMENT COMPANY. *A Quick Course on Magnetic, Cable and Pipe Locating*. 2003. vyd. 2003. Dostupné z: <http://www.engineersupply.com/magnetic-pipe-cable-locating.pdf>
- [2] Kapacitní vazba. Encyklopedie elektromagnetické kompatibility [online]. [cit. 2014-05-6]. Dostupné z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/node14.html>
- [3] Mohr, Richard J., "Coupling between Lines at High Frequencies," *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, vol.9, no.3, pp.127,129, Dec. 1967  
doi: 10.1109/TEMC.1967.
- [4] RACHIDI, F a S TKACHENKO. *Electromagnetic field interaction with transmission lines: from classical theory to HF radiation effects*. Boston: WIT, c2008, 259 p. ISBN 18-456-4063-2.
- [5] POZAR, David M. *Microwave engineering*. 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, c2012, xvii, 732 p. ISBN 04-706-3155-4.
- [6] VAŇÁSKOVÁ, Lenka. *Bezpečnostní detektory kovů na letištích*. Zlín, 2011. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky.
- [7] GUELLE .., Authors: Dieter.. *Metal detector handbook for humanitarian demining: a book about metal detectors, covering detection procedures in the field, and the testing and evaluation of metal detectors for humanitarian demining*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2003. ISBN 92-894-6236-1.
- [8] KEMPŇÝ, Milan. FEI STU BRATISLAVA. *Moderné systémy detekcie kovov*. Dostupné z: [http://ec.elf.stuba.sk/kme/buxus/docs/predmety/SOBO/Doplňky/Moderne\\_systemy\\_detekcie\\_kov](http://ec.elf.stuba.sk/kme/buxus/docs/predmety/SOBO/Doplňky/Moderne_systemy_detekcie_kov)
- [9] BENDA, Lukáš. *Optimalizace detektoru kovů*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. Západočeská Univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.
- [10] MAAS, Stephen A. *The RF and microwave circuit design cookbook*. Boston: Artech House, 1998, xviii, 267 s. ISBN 08-900-6973-5.
- [11] *AtosElektro* [online]. © 2010 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://shop.atoselektro.cz/>
- [12] *Ynářadí* [online]. 2014 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://www.ynaradi.cz/>

- [13] *Conrad Electronic* [online]. © 2014 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://www.conrad.cz/>
- [14] *Cable Detection Ltd.* [online]. © 2014 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.cabledetection.co.uk/>
- [15] WIPL-D TEAM. *WIPL-D Pro v8.0 3D Electromagnetic Solver Professional Edition: User's Manual*. 2010.
- [16] HIEBEL, Michael. *Fundamentals of vector network analysis*. München: Rhode, 2007, 419 s. ISBN 978-3-939837-06-0.
- [17] ROHDE&SCHWARZ [online]. © 2014 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: <http://www.rohde-schwarz.com/>
- [18] DOMITRA, Aleš. *Stínění osob před vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem pomocí stíněných obleků*. Zlín, 2011. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky.
- [19] Research Electronics International [online]. © 2014 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: <http://www.research-electronics.com>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$U [V]$	Elektrický potenciál
$I [A]$	Elektrický proud
$R [\Omega]$	Elektrický odpor
$Z [\Omega]$	Impedance
$L [H]$	Indukčnost
$C [F]$	Kapacita
$Q [C]$	Elektrický náboj
$E [Vm^{-1}]$	Intenzita elektrického pole
$\phi [V]$	Elektrický potenciál
$\tau [Cm^{-1}]$	Lineární hustota náboje
$\epsilon [Fm^{-1}]$	Permitivita
VLF	Velmi nízké frekvence
VF	Vysoké frekvence
UTP	Kroucená dvojlinka

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1. Obvod s kapacitní vazbou.....	15
Obr. 2. Náhradní schéma obvodu s kapacitní vazbou.....	16
Obr. 3. Znázorněné pole mezi vodiči.....	16
Obr. 4. Náhradní schéma bez odporů .....	18
Obr. 5. Definovaná dvoulinka.....	19
Obr. 6. Náhradní schéma kroucené dvoulinky .....	19
Obr. 7. Měřicí soustava indukčního principu měření. ....	20
Obr. 8. Jednoportový obvod .....	25
Obr. 9 Nahrazení impedance odporem .....	26
Obr. 10. Nahrazení impedance napět'ovým zdrojem .....	26
Obr. 11. Schéma s použitím superpozice.....	26
Obr. 12. Schéma s použitím superpozice.....	27
Obr. 13. Detektor MD-12 .....	33
Obr. 14. Detektor Stanley S100 .....	33
Obr. 15. Detektor Stanley s LCD.....	34
Obr. 16. Detektor Volcraft LSG-4 DMM.....	35
Obr. 17. Detektor 801K Premium.....	35
Obr. 18. Detektor Fluke 2042 .....	36
Obr. 19. Detektor EZiCAT i750xf .....	37
Obr. 20. Generátor EZiTEX t300xf.....	38
Obr. 21. Základní rozhraní programu WIPL-D .....	40
Obr. 22. Lišta ikon v programu WIPL-D.....	40
Obr. 23. Okno s výsledky v programu WIPL-D.....	41
Obr. 24. Rozměry vázaného vedení.....	43
Obr. 25. Náhradní schéma vázaného vedení.....	43
Obr. 26. Schéma kapacity $C_0$ .....	44
Obr. 27. Schéma kapacity $2 C_0$ .....	44
Obr. 28. Schéma zapojení v programu Microwave Office .....	45
Obr. 29. Výsledek v programu Microwave Office .....	46
Obr. 30. Grafické znázornění řešeného obvodu .....	47
Obr. 31. S-parametry řešeného obvodu mezi uzli 1 a 2.....	48
Obr. 32. Výsledné pole kolem vodičů .....	48



Obr. 33. ROHDE & SCHWARZ SM300 .....	50
Obr. 34. Signál generátoru WHG .....	51
Obr. 35. ROHDE & SCHWARZ FSH3 .....	51
Obr. 36. ROHDE & SCHWARZ HZ-11 Sphere 3,6 cm .....	52
Obr. 37. Detektor odposlechů CPM-700 .....	52
Obr. 38. Schéma zapojení měření .....	53
Obr. 39. Měřicí stanoviště.....	53
Obr. 40. Grafické znázornění intenzity signálu na ose Y .....	54
Obr. 41. Grafické znázornění intenzity signálu na ose Z.....	55
Obr. 42. Grafické znázornění intenzity signálu na ose Y ve vzdálenosti 50 cm .....	56
Obr. 43. Grafické znázornění intenzity signálu na ose Z ve vzdálenosti 50 cm.....	56
Obr. 44. Grafické znázornění intenzity signálu na ose Y .....	59
Obr. 45. Grafické znázornění intenzity signálu na ose Z.....	59
Obr. 46. Grafické znázornění intenzity signálu na ose Y ve vzdálenosti 50 cm .....	60
Obr. 47. Grafické znázornění intenzity signálu na ose Y ve vzdálenosti 50 cm .....	61
Obr. 48. Schéma zapojení měření .....	62
Obr. 49. Přiložený generátor WHG k vedení 230 V.....	62
Obr. 50. Grafické znázornění intenzity signálu na ose Y .....	63
Obr. 51. Grafické znázornění intenzity signálu na ose Z.....	64
Obr. 52. Grafické znázornění intenzity signálu na ose Y ve vzdálenosti 50 cm .....	64
Obr. 53. Grafické znázornění intenzity signálu na ose Z ve vzdálenosti 50 cm.....	65

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1. Poměr hodnot $I_{1/2}$ .....	21
Tab. 2. Parametry detektoru MD-12 .....	33
Tab. 3. Parametry detektoru Stanley S100 .....	34
Tab. 4. Parametry detektoru Stanley s LCD .....	34
Tab. 5. Parametry detektoru Volcraft LSG-4 DMM .....	35
Tab. 6. Parametry detektoru 801K Premium .....	36
Tab. 7. Parametry detektoru Fluke 2042.....	36
Tab. 8. Parametry detektoru EZiCAT i750xf .....	37
Tab. 9. Parametry generátoru EZiTEX t300xf .....	38
Tab. 10. Rozmístění uzlových bodů .....	47
Tab. 11. Použité přístroje .....	50
Tab. 12. Naměřené hodnoty na ose Y .....	54
Tab. 13. Naměřené hodnoty na ose Z .....	55
Tab. 14. Naměřené hodnoty na ose Y ve vzdálenosti 50 cm.....	55
Tab. 15. Naměřené hodnoty na ose Z ve vzdálenosti 50 cm .....	56
Tab. 16. Naměřené hodnoty na delších vzdálenostech .....	57
Tab. 17. Naměřené hodnoty na ose Y .....	58
Tab. 18. Naměřené hodnoty na ose Z .....	59
Tab. 19. Naměřené hodnoty na ose Y ve vzdálenosti 50 cm.....	60
Tab. 20. Naměřené hodnoty na ose Z ve vzdálenosti 50 cm .....	60
Tab. 21. Naměřené hodnoty na delších vzdálenostech .....	61
Tab. 22. Naměřené hodnoty na ose Y .....	63
Tab. 23. Naměřené hodnoty na ose Z .....	63
Tab. 24. Naměřené hodnoty na ose Y ve vzdálenosti 50 cm.....	64
Tab. 25. Naměřené hodnoty na ose Z ve vzdálenosti 50 cm .....	65
Tab. 26. Naměřené hodnoty na delších vzdálenostech .....	65

## SEZNAM PŘÍLOH

- P I: Výpočet v programu MATLAB – na CD
- P II: Simulace v programu Microwave Office – na CD
- P III: Simulace v programu WIPL-D – na CD