

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

---

Fakulta Elektrotechnická



Bakalářská práce

ANALÝZA MIKROVLNNÝCH OBVODŮ METODOU  
ORIENTO VANÝCH GRAFŮ

Autor: Adam Bartyzal

Studijní obor: Komunikační technika

Katedra elektromagnetického pole

Vedoucí práce: Ing. Ladislav Oppl, Ph.D.

Letní semestr 2016

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra elektromagnetického pole

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Adam Bartyzal**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika  
Obor: Komunikační technika

Název tématu: **Analýza mikrovlnných obvodů metodou orientovaných grafů**

Pokyny pro vypracování:

S využitím programového prostředí Matlab vytvořte skript pro výpočet napětového přenosu mezi dvěma libovolnými branami mikrovlnného obvodu, který bude založen na metodě analýzy obvodů pomocí orientovaných grafů. Při řešení uvedené problematiky dbejte i na uživatelsky přívětivé rozhraní. Správnou funkci softwaru ověřte na řešených příkladech z doporučené literatury.

Seznam odborné literatury:

- [1] Oppl, L.: Úvod do mikrovlnné techniky – Sběrka příkladů. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2008
- [2] Vrba, J.: Úvod do mikrovlnné techniky. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2007

Vedoucí: Ing. Ladislav Oppl, Ph.D.

Platnost zadání: LS 2016/2017

L.S.

prof. Ing. Pavel Pechač, Ph.D.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 19. 2. 2016

# Prohlášení

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

V Praze dne.....

.....podpis autora

# Poděkování

Rád bych tímto poděkoval Ing. Ladislavu Opplovi, Ph.D. za cenné rady a konzultace týkající se bakalářské práce v průběhu semestru.

# Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem programu, který sestavuje a počítá přenosové funkce v mikrovlnných obvodech pomocí Masonova pravidla. V první části je přiblížena problematika analýzy vysokofrekvenční techniky. Jsou zde stručně popsány Maxwellovy a telegrafní rovnice, Smithův diagram a rozptylové parametry. Další část je věnována popisu metody orientovaných grafů, její souvislost s rozptylovými parametry a vysvětlení Masonova pravidla. Poslední část se věnuje konkrétnímu řešení: algoritmizaci, návrhu uživatelského rozhraní a testování programu na příkladech z doporučené literatury.

**Klíčová slova:** Matlab, orientované grafy, Masonovo pravidlo, mikrovlnné obvody

# Abstract

This thesis describes the design of a program that compiles and calculates the transfer function of microwave circuits using Mason's rule. The first part focuses on the high-frequency analysis techniques. There is brief outline of Maxwell's and telegraph equations, Smith chart and scattering parameters. Another section is devoted to description of the signal-flow graph method, its association with scattering parameters and explanation of Mason's rule. The last part deals with the particular solution: algorithms, user interface design and testing of the program on examples from the literature.

**Keywords:** Matlab, directed graphs, Mason's rule, microwave circuits

# Obsah

1	Úvod .....	1
1.1	Motivace .....	1
1.2	Cíl.....	1
1.3	Popis práce .....	1
2	Mikrovlnná technika a její analýza.....	2
2.1	Oblast působení .....	2
2.2	Popis mikrovlnných obvodů.....	3
2.2.1	Maxwellovy rovnice .....	3
2.2.2	Telegrafní rovnice .....	4
2.2.3	Smithův Diagram.....	5
2.2.4	Rozptylové parametry.....	6
2.3	Prvky využívané v mikrovlnné technice .....	7
2.3.1	Vedení .....	7
2.3.2	Generátory.....	9
2.3.3	Měřicí zařízení .....	9
2.3.4	Vybrané prvky mikrovlnných obvodů .....	10
3	Metoda orientovaných grafů.....	13
3.1	Úvod do teorie grafů .....	13
3.2	Reprezentace grafu.....	14
3.2.1	Seznam hran .....	14
3.2.2	Grafické znázornění .....	14
3.2.3	Seznam sousedů .....	14
3.2.4	Matice sousednosti.....	15
3.2.5	Matice incidence .....	16
3.3	Dělení grafů .....	16
3.3.1	Neorientované.....	16

3.3.2	Orientované.....	17
3.4	Práce s grafy .....	18
3.4.1	Pravidla pro práci s grafy.....	18
3.4.2	Postupné úpravy .....	18
3.4.3	Masonovo pravidlo .....	19
4	Vlastní programové řešení.....	20
4.1	Zvolené programovací prostředí.....	20
4.2	Struktura programu.....	20
4.3	Algoritmizace a implementace .....	21
4.3.1	Reprezentace grafu v programu.....	21
4.3.2	Průchod grafem .....	22
4.3.3	Hledání smyček .....	25
4.3.4	Sestavení vzorce podle Masonova pravidla .....	26
4.3.5	Dosazení do vzorce .....	26
4.3.6	Další funkce.....	26
4.4	Návrh uživatelského rozhraní .....	26
4.4.1	Hlavní okno.....	27
4.4.2	Výběr prvků.....	28
4.4.3	Okno zadávání .....	28
4.4.4	Spojování .....	29
4.4.5	Výpočet přenosu.....	30
4.4.6	Ukládání / Načítání .....	30
4.5	Databáze .....	31
4.5.1	Úprava databáze .....	31
4.6	Finální podoba .....	32
5	Testování.....	33
5.1	Příklad 12.1.....	33
5.2	Příklad 12.2.....	34
5.3	Příklad 12.3.....	35
5.4	Příklad 12.4.....	36
5.5	Příklad 12.5.....	38
5.6	Příklad 12.6.....	39
5.7	Zhodnocení .....	40
6	Závěr .....	41



## Seznam obrázků

Obrázek 1: Elementární úsek vedení.....	4
Obrázek 2: Smithův diagram.....	6
Obrázek 3: Obdélníkový vlnovod.....	7
Obrázek 4: Koaxiální kabel.....	8
Obrázek 5: Mikropáskové vedení.....	8
Obrázek 6: Dvou vodičové vedení.....	9
Obrázek 7: Grafické znázornění grafu.....	14
Obrázek 8: Příklad matice sousednosti neorientovaného grafu.....	15
Obrázek 9: Příklad matice sousednosti orientovaného grafu.....	15
Obrázek 10: Příklad vážené matice sousednosti.....	16
Obrázek 11: Příklad matice incidence.....	16
Obrázek 12: Příklad neorientovaného grafu.....	17
Obrázek 13: Příklad orientovaného grafu.....	17
Obrázek 14: Základní přiřazení rovnice.....	18
Obrázek 15: Přenos přímé cesty.....	18
Obrázek 16: Součet.....	18
Obrázek 17: Odstranění vlastní smyčky.....	19
Obrázek 18: Struktura programu.....	21
Obrázek 19: Vývojový diagram funkce <code>paths_direct</code> .....	23
Obrázek 20: Ukázkový graf.....	24
Obrázek 21: Znázornění průchodu grafem.....	25
Obrázek 22: Hlavní okno programu.....	27
Obrázek 23: Výběr prvku.....	28
Obrázek 24: Zadávání parametrů vkládaného prvku.....	28
Obrázek 25: Panel spojování.....	29
Obrázek 26: Panel výpočtů.....	30
Obrázek 27: Dialog pro ukládání, načítání.....	30
Obrázek 28: Přidání prvku do databáze.....	31
Obrázek 29: Prostředí Matlab Compiler.....	32
Obrázek 30: Orientovaný graf obvodu 12.1.....	33
Obrázek 31: Příklad 12.1 spočítaný programem.....	34
Obrázek 32: Orientovaný graf obvodu 12.2.....	34
Obrázek 33: Příklad 12.2 spočítaný programem.....	35

Obrázek 34: Orientovaný graf obvodu 12.3 .....	36
Obrázek 35: Příklad 12.3 spočítaný programem .....	36
Obrázek 36: Orientovaný graf obvodu 12.4 .....	37
Obrázek 37: Příklad 12.4 spočítaný programem .....	37
Obrázek 38: Orientovaný graf obvodu 12.5 .....	38
Obrázek 39: Příklad 12.5 spočítaný programem .....	38
Obrázek 40: Orientovaný graf obvodu 12.6 .....	39
Obrázek 41: Příklad 12.6 spočítaný programem .....	39

## Seznam použitých symbolů

<b>B</b>	magnetická indukce [T]
<i>C</i>	kapacita [F]
<b>D</b>	elektrická indukce [ $C \cdot m^{-2}$ ]
<b>E</b>	intenzita elektrického pole [ $V \cdot m^{-1}$ ]
<i>G</i>	příčná admitance [S]
<b>H</b>	intenzita magnetického pole [ $A \cdot m^{-1}$ ]
<i>I</i>	elektrický proud [A]
<b>J</b>	proudová hustota [ $A \cdot m^{-2}$ ]
<i>j</i>	imaginární jednotka [-]
<i>k</i>	konstanta šíření [ $m^{-1}$ ]
<i>L</i>	indukčnost [H]
<i>l</i>	délka [m]
<i>P</i>	výkon [W]
<i>Q</i>	náboj [C]
<i>R</i>	elektrický odpor [ $\Omega$ ]
<i>RL</i>	koeficient odrazu [dB]
<i>S</i>	plocha [ $m^2$ ]
<b>S</b>	rozptylová matice [-]
$s_{ij}$	koeficient přenosu z brány <i>j</i> do brány <i>i</i> [-]
<i>t</i>	čas [s]
<i>T</i>	přenosová funkce [-]
<i>U</i>	napětí [V]
<i>Y</i>	admitance [S]
<i>Z</i>	impedance [ $\Omega$ ]
$\Gamma$	koeficient odrazu [-]
$\varrho_0$	objemová hustota náboje [ $A \cdot m^{-2}$ ]
$\Phi$	magnetický tok [Wb]
$\Psi$	elektrický indukční tok [C]
$\omega$	úhlový kmitočet [ $rad \cdot s^{-1}$ ]



# 1 Úvod

## 1.1 Motivace

V posledních několika desetiletích se s rostoucími nároky na přenos dat a zaplněním dosavadních rádiových pásem bezdrátová technologie přesouvá do oblasti vyšších frekvencí. S tímto posunem ovšem vznikají nové problémy při návrhu elektronických zařízení a vzhledem k parazitním jevům vzrůstá jejich složitost.

Díky stále výkonnějším počítačům však nemusíme provádět složité matematické operace analyticky, ale můžeme využít simulační software. Takový software, i přes svou komplexnost, staví na původních analyzačních metodách jako Smithův diagram, či výpočet telegrafních rovnic.

## 1.2 Cíl

Cílem této práce je navrhnout a sestavit algoritmus pro výpočet napěťového přenosu mezi dvěma libovolnými branami mikrovlnného obvodu, který bude založen na metodě analýzy obvodů pomocí orientovaných grafů. Tento algoritmus by měl být implementován v programovacím prostředí Matlab do jednoduché aplikace s uživatelsky přívětivým grafickým rozhraním.

## 1.3 Popis práce

Tato práce spojuje dohromady trojici vědních oborů. Mikrovlnnou techniku, teorii grafů a programování. Stručný úvod do vysokofrekvenčního oboru, jehož problematika je zkoumána a rozvíjena od druhé poloviny minulého století, je popsán v druhé kapitole. Po ní následuje objasnění pojmu graf, způsoby jeho reprezentace, možných úprav a vysvětlení Masonova pravidla. Čtvrtá kapitola se věnuje popisu navrženého programu, použitým algoritmům a rozložení uživatelského rozhraní. Poslední kapitola je zaměřena na testování programu na příkladech ze skript [1].

## 2 Mikrovlnná technika a její analýza

### 2.1 Oblast působení

Mikrovlnná technika je technický obor zabývající se elektromagnetickým vlněním. Za mikrovlnnou oblast obvykle označujeme frekvenční pásmo přibližně od 300 MHz do 3 THz. [2]

V takto velkém kmitočtovém rozsahu se nalézá mnoho elektrotechnických disciplín od telekomunikací přes mikrovlnný ohřev až po medicínské účely. Rozdělení do pásem a příklady použití jsou uvedeny v následující tabulce.

Název	Zkratka	Rozsah	Vlnová délka	Použití
Ultra vysoké frekvence	UHF	0,3 – 3 GHz	100 – 10 cm	televizní vysílání, mobilní telefony, Wi-Fi, mikrovlnný ohřev
Super vysoké frekvence	SHF	3 – 30 GHz	10 – 1 cm	Wi-Fi, vysokorychlostní datové přenosy
Extrémně vysoké frekvence	EHF	30 - 300 GHz	10 – 1 mm	radioastronomie
Infračervené spektrum	IR	0,3 – 3 THz	1 – 0,1 mm	noční vidění

Při návrhu zařízení pracujících na takto vysokých frekvencích nelze spoléhat na metody využívané v nízkofrekvenční technice. Například u diskrétních součástek se projevují parazitní jevy, které mohou nejen změnit jejich parametry ale i jejich celkovou povahu. Zařízení, jejichž velikost je obdobná vlnové délce, se kterou

pracují, se nazývají obvody s rozprostřenými parametry. Pro práci s nimi je třeba znát následující nástroje.

## 2.2 Popis mikrovlnných obvodů

### 2.2.1 Maxwellovy rovnice

Základním kamenem popisu elektromagnetického pole jsou Maxwellovy rovnice. Představil je James Clerk Maxwell v roce 1873 ve své práci „Pojednání o elektřině a magnetismu“. Lze je zapsat buď v integrálním tvaru, kdy popisují pole v jisté ploše či objemu, nebo v diferenciálním tvaru, jenž popisuje elektromagnetické pole v bodě.

Následující rovnice jsou převzaty z [3].

- **Ampérův zákon celkového proudu:**

$$\oint_c \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I + \frac{d\psi}{dt} \quad (2.1)$$

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J}_0 + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

říká, že sečteme-li jednotlivé příspěvky magnetické intenzity v uzavřené křivce  $c$ , získáme celkový proud procházející touto smyčkou.

- **Faradayův indukční zákon:**

$$\oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (2.3)$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.4)$$

tvrdí, že pokud se s časem mění magnetické pole, tak v elektrickém vodiči umístěném do tohoto pole se naindukuje elektrické napětí.

- **Gaussův zákon elektrostatiky:**

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = Q \quad (2.5)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho_0 \quad (2.6)$$

vyjadřuje vztah mezi tokem elektrické intenzity a elektrickým nábojem a to tak, že tok elektrické intenzity uzavřenou plochou je přímo úměrný elektrickému náboji  $Q$

- **Zákon spojitosti indukčního toku:**

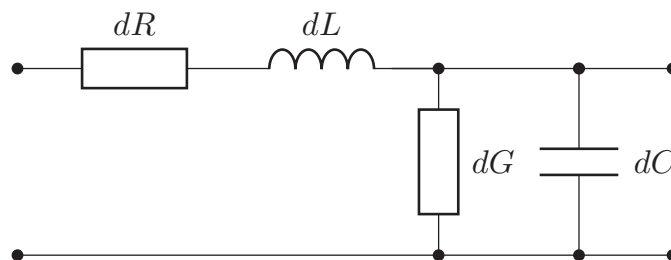
$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (2.7)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (2.8)$$

dokazuje skutečnost neexistence magnetických monopolů, tedy že magnetický indukční tok libovolnou uzavřenou plochou  $S$  je roven nule.

## 2.2.2 Telegrafní rovnice

Maxwellovy rovnice se ovšem hodí spíše k teoretickému popisu problematiky elektromagnetického pole než k praktickému návrhu vysokofrekvenčních obvodů. V souvislosti s rozvojem přenosu informace na větší vzdálenosti vznikly odvozením z Maxwellových rovnic tzv. telegrafní rovnice.



Obrázek 1: Elementární úsek vedení

Podle [4] můžeme pomocí schématu elementárního úseku homogenního vedení určit primární parametry vedení a to:

podélnou impedanci:



$$Z = R + j\omega L \quad (2.9)$$

příčnou admitanci:

$$Y = G + j\omega C \quad (2.10)$$

Při zavedení komplexní konstanty šíření:

$$k = -j\sqrt{ZY} \quad (2.11)$$

můžeme zapsat telegrafní rovnice ve tvaru:

$$\frac{d^2 U(z)}{dz^2} + k^2 U(z) = 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{d^2 I(z)}{dz^2} + k^2 I(z) = 0 \quad (2.13)$$

### 2.2.3 Smithův Diagram

Smithův diagram je grafická pomůcka, kterou vynalezl Phillip H. Smith během svých prací v Bellových telefonních laboratořích. Nekonečně velkou polorovinu komplexních impedancí s kladnou reálnou složkou převádí do konečného kruhového diagramu.

Střední vodorovná osa se nazývá osa čistých rezistancí. Je to jediné místo v diagramu, kde se nachází impedance s pouze reálnou složkou. Jejím opakem je kružnice čistých reaktancí, která tvoří obvod diagramu.

Postupně zmenšující se kružnice se středy na vodorovné ose se nazývají kružnice konstantní rezistance a spojují impedance se stejnou reálnou složkou. Horní polovina diagramu obsahuje impedance s kapacitní reaktancí, dolní polovina obsahuje induktivní reaktance.

Při práci se Smithovým diagramem se používá tzv. normovaná impedance, která se spočítá podle vztahu:

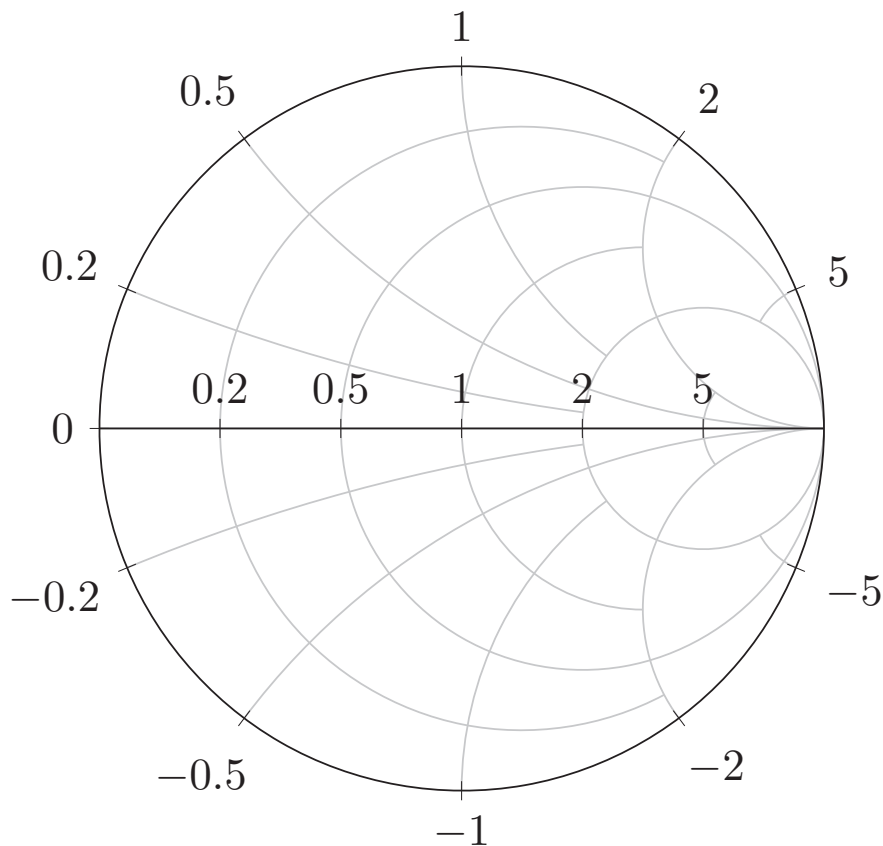
$$z = \frac{Z}{Z_0} \quad (2.14)$$

kde  $Z_0$  je charakteristická impedance analyzovaného obvodu.

Smithův diagram se využívá k:

- Transformaci impedance podél vedení
- Měření impedance

- Přizpůsobování impedance – sériově či paralelně



Obrázek 2: Smithův diagram

## 2.2.4 Rozptylové parametry

V této práci se více než Maxwellovy rovnice či Smithův diagram využívají rozptylové parametry (někdy označované jako s-parametry z anglického Scattering parameters).

Na mikrovlnné obvody se můžeme dívat jako na mnohobrany. Z hlediska návrhu obvodu nás příliš nezajímá rozložení pole uvnitř jednotlivých prvků, ale hodnoty napětí na jednotlivých branách ve formě komplexních čísel.

Označíme-li napětovou vlnu vstupující do mnohobrany  $n$ -tou branou  $a_n$  a vlnu vystupující  $b_n$ , můžeme pak vztah mezi  $a_n$  a  $b_n$  vyjádřit následovně:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdot & \cdot & s_{1n} \\ s_{21} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ s_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & s_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_n \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Matice  $\mathbf{S}$  se nazývá rozptylová matice. V některých případech jí můžeme určit také přepočtem z matice impedanční  $\mathbf{Z}$  (resp. admitanční  $\mathbf{Y}$ ). Je-li  $n$ -bran reciproký platí:

$$\mathbf{S}^T = \mathbf{S} \quad (2.16)$$

Často se také pracuje s normovanými rozptylovými parametry. V případě, že je v obvodu použito vedení s charakteristickou impedancí  $Z_0$ , přepočítáváme jednotlivé proměnné podle této hodnoty pomocí vztahů:

$$a_n = \frac{U_n^+}{\sqrt{Z_{0n}}}, b_n = \frac{U_n^-}{\sqrt{Z_{0n}}}, \quad (2.17)$$

kde,  $U_n^+$  a  $U_n^-$  označují amplitudu vstupní a výstupní napěťové vlny na  $n$ -té bráně.

## 2.3 Prvky využívané v mikrovlnné technice

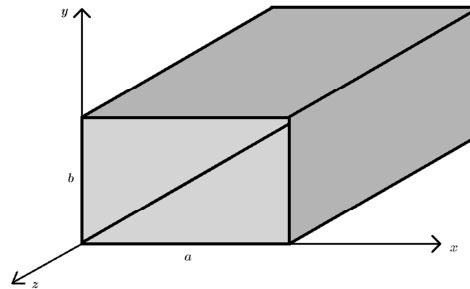
Protože je mikrovlnná technika velice rozsáhlý vědní obor, zařízení a prvků s ní související je nepřehledné množství. V následujících podkapitolách je v několika kategoriích popsán výběr těch, které souvisí s touto prací.

*Poznámka:* Na následujících obrázcích je vždy vodivá část vyvedena tmavě a dielektrikum světle.

### 2.3.1 Vedení

- Vlnovody

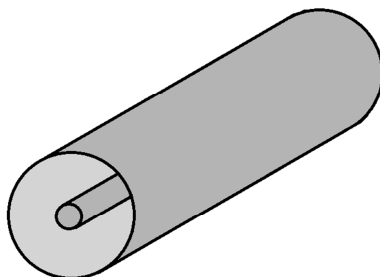
Kovové trubky nejčastěji s obdélníkovým či kruhovým tvarem s vysoce vodivými (např. postříbřenými) stěnami, vyplněné dielektrikem (nejčastěji vzduchem). Vyznačují se velmi malým měrným útlumem.



Obrázek 3: Obdélníkový vlnovod

- **Koaxiální kabely**

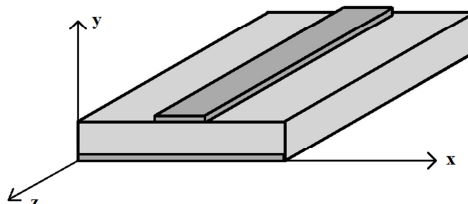
Vedení sestávající se ze středního vodiče, dielektrické výplně a vodivého obalu.



Obrázek 4: Koaxiální kabel

- **Mikropáskové vedení**

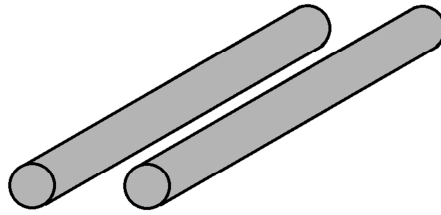
Podobné desce plošných spojů, vodivá vrstva nanese na dielektrický substrát v podobě pásků. Co se ztrát týče, jedná se o jeden z nejhorších typů vedení. Mikropáskem lze ovšem vytvářet složité struktury např. pásmové filtry.



Obrázek 5: Mikropáskové vedení

- **Dvou vodičové vedení**

Tzv. dvoulinka je vedení složené ze dvou paralelních vodičů. Vyznačuje se velkými ztrátami vyzařováním.



Obrázek 6: Dvouvodičové vedení

### 2.3.2 Generátory

Možností jak generovat mikrovlnný signál je celá řada. V zařízeních s nízkým výstupním výkonem se využívají krystalové oscilátory ve spojení s prvkem se záporným diferenciálním odporem. Vyšší výkon se generuje pomocí speciálních mikrovlnných elektronek, jako jsou magnetron, klystron nebo permaktron.

### 2.3.3 Měřicí zařízení

Měření ve vysokofrekvenční technice je obor, popisující mnoho různých měřících metod mnoha různých parametrů. Protože větve orientovaných grafů jsou váhovány rozptylovými parametry, jsou v této práci blíže popsány následující dva měřící přístroje.

- **Skalární analyzátor**

je zařízení měřící moduly rozptylových parametrů. Skládá se z generátoru, detektoru, směrového můstku či směrové vazby a zobrazovacích obvodů.

Při skalárním měření odrazů se vychází z parametru Return Loss:

$$RL = -10 \log \frac{P_2}{P_1} = -20 \log \frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}} = -20 \log |\Gamma| \quad (2.18)$$

který česky bývá označován jako útlum odrazu. Jedná se o poměr napěťové vlny odražené od měřeného prvku vůči napěťové vlně vstupující vyjádřený v decibelech. Proto lepší skalární analyzátoři disponují pamětí, do které se uloží hodnota vstupního napětí a tou se poté dělí naměřené hodnoty odražené vlny.

- **Vektorový analyzátor**

Vektorový analyzátor je složitější a dražší zařízení. Na rozdíl od skalárního analyzátoru, měří jak modul koeficientu odrazu, tak jeho fázi. Naměřenou frekvenční závislost dokáže zobrazit v kartézském souřadném systému nebo do polárního Smithova diagramu. Díky tomu lze odhalit různé rezonance a jiné parazitní jevy vyskytující se na vyšších frekvencích, které by při skalárním měření nebyly patrné.

Velkou výhodou vektorového analyzátoru je možnost kalibrace – posunu referenční roviny. Při připojení kalibrů (typicky zkrat, otevřený konec a jmenovitá impedance) na konec měřícího vedení a provedení kalibrace si vektorový analyzátor přívodní kabely, propojovací, útlumové články a další prvky trasy uloží jako vnitřní čtyř-bran a pomocí jeho s-parametrů přepočítává následujících měření tak, že referenční rovina je přímo na svorkách měřeného prvku.

### 2.3.4 Vybrané prvky mikrovlnných obvodů

- **Otevřený konec**

Je zakončení vedení s nekonečnou impedancí. Od takového prvku se odráží veškerá dopadající energie se stejnou fází. Z hlediska rozptylových parametrů se jedná o jednobran s koeficientem odrazu:

$$\mathbf{S} = s_{11} = 1 \quad (2.19)$$

- **Zkrat**

Podobně jako otevřený konec se zkrat dá definovat jako jednobran. Jeho impedance je nulová a na rozdíl od otevřeného konce má odražená vlna opačnou fázi než vlna dopadající. Jeho s-parametr:

$$\mathbf{S} = s_{11} = -1 \quad (2.20)$$

- **Bezodrazová koncovka**

Dalším z jednobranných prvků je bezodrazová koncovka. Jedná se o impedančně přizpůsobený prvek, který neodráží energii. Má široké spektrum použití, například při měření rozptylových parametrů musí být všechny neměřené brány zakončeny bezodrazově. Koeficient odrazu se rovná:

$$\mathbf{S} = s_{11} = 0 \quad (2.21)$$

- **Útlumový prvek**

Mikrovlnný zeslabovač (atenuátor) je reciprokový dvoubran sloužící k utlumení procházející elektromagnetické vlny. Jeho ideální rozptylová matice je dána vztahem:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & s_{12} \\ s_{21} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

kde  $s_{12} = s_{21} = 10^{\frac{-L}{20}}$  a  $L$  odpovídá měrnému útlumu v dB.

- **Izolátor**

Tento prvek se vyznačuje schopností přenášet energii pouze v jednom směru. Používá se například k ochraně zařízení, jež by vracející se energie mohla poškodit.

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

- **Posouvač fáze**

Jak už z názvu vyplývá, tento reciprokový dvoubran mění fázi procházející elektromagneticky vlny.

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & s_{12} \\ s_{21} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

kde  $s_{12} = s_{21} = e^{-j\beta l}$ . Fázový posun  $\beta l$  se v praxi realizuje změnou polohy dielektrika ve vlnovodu, či postupnou změnou jeho rozměrů.

- **Cirkulátor**

Ideální cirkulátor je trojbran, který veškerou energii dopadající do  $n$ -té brány posílá na následující bránu.

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ nebo } \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

- **Magické T**

Dalším typickým prvkem je můstkové T. Jedná se o mikrovlnný čtyřbran, který dělí dopadající energii vždy do dvou dalších bran, přičemž třetí je izolována.

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

- **Směrový vazební člen**

Vazební člen neboli odbočnice je člen skládající se ze dvou vedení propojených, či umístěných tak, že se elektromagnetická vlna naváže z jednoho do druhého. V praxi se používá například při měření odrazů.

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & a & \beta & 0 \\ a & 0 & 0 & -\beta \\ \beta & 0 & 0 & a \\ 0 & -\beta & a & 0 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

kde mezi parametry  $a$  a  $\beta$  platí:  $a^2 + \beta^2 = 1$



## 3 Metoda orientovaných grafů

Ve světě častěji zvaná Metoda signálových grafů [5] (Signal-flow graph method) je způsob reprezentace matematických rovnic popisujících technické systémy pomocí struktur zvaných Orientované grafy.

### 3.1 Úvod do teorie grafů

Teorie grafů je podobor matematické informatiky, zabývající se strukturami zvanými grafy. Grafy mohou reprezentovat struktury z různých vědních oborů a pomocí matematických operací nad nimi můžeme řešit složité problémy od hledání nejkratších cest pro zakopání telekomunikačních kabelů přes výpočty hodnot v elektronických obvodech až po optimalizaci neuronových sítí.

Základními prvky grafu jsou:

- Uzel – (někdy také vrchol) součást grafu reprezentující objekt či místo v analyzované struktuře.
- Větev – (někdy také hrana) cesta spojující přímo dva uzly. Větvím se přiřazuje váha, která může značit vzdálenost dvou uzlů, cenu výstavby daným směrem, napěťový přenos atd.

Při práci s grafy se definují následující pojmy:

- Cesta - spojení větví mezi dvěma uzly.
- Přímá cesta – spojení, které žádným uzlem neprochází vícekrát.
- Smyčka – přímá cesta začínající a končící ve stejném uzlu.
- Vlastní smyčka – větev, jež začíná a končí ve stejném uzlu.
- Podgraf – (někdy také subgraf) je takový graf, který vznikne vypuštěním některých uzlů nebo některých hran.
- Přímý graf – struktura obsahující pouze přímé cesty.
- Smyčkový graf - struktura obsahující alespoň jednu smyčku.
- Úplný graf – Speciální případ grafu, ve kterém jsou veškeré dvojice uzlů spojeny větví.

Grafy dělíme na neorientované a orientované, podle toho jestli větev mezi uzly tvoří neuspořádaná či uspořádaná dvojice. Zjednodušeně řešeno, záleží-li na směru trasy, či nikoli.

## 3.2 Reprezentace grafu

Grafy lze reprezentovat mnoha způsoby. Výběr toho vhodného záleží na použití. Pokud s grafy pracuje člověk, často se využívá grafický způsob. Počítače naopak pracují se seznamy, či častěji maticovým zápisem grafu.

### 3.2.1 Seznam hran

Nejjednodušším způsobem jak reprezentovat strukturu grafu je pomocí výčtu jednotlivých vrcholů a poté seznamem hran.

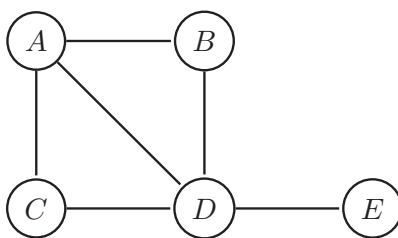
*Příklad:* Neorientovaný graf má 5 vrcholů A až E a seznam hran AB, AC, AD, BD, CD, DE.

Tento způsob je vhodný pro zadávání matematických úloh či ukládání na pevný disk.

### 3.2.2 Grafické znázornění

Pro lepší představu se v tištěných materiálech téměř vždy graf uvádí v grafické podobě.

*Příklad:* Zobrazení grafu z kapitoly 3.2.1.



Obrázek 7: Grafické znázornění grafu

### 3.2.3 Seznam sousedů

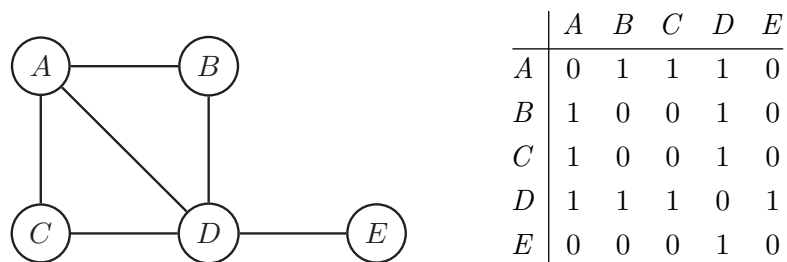
Další způsob jak zapsat graf je pomocí tabulky. V jejím levém sloupci se nachází seznam všech vrcholů a v pravém, seznam uzlů, se kterými v grafu sousedí.

*Příklad:* Seznam sousedů grafu z kapitoly 3.2.2.

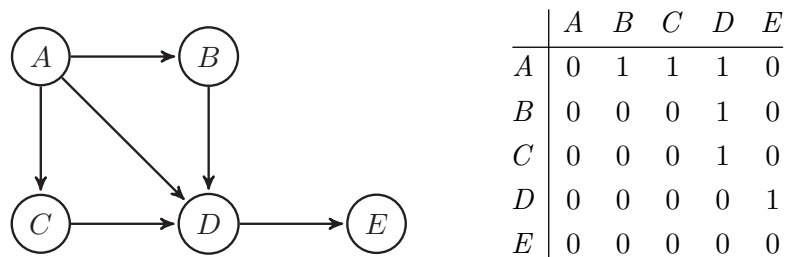
Uzel	Sousedí s:
A	B, C, D
B	A, D
C	A, D
D	A, B, C, E
E	D

### 3.2.4 Matice sousednosti

Jinou, než grafickou reprezentací grafu může být vyjádření pomocí matice sousednosti. Jedná se o čtvercovou matici o rozměrech  $(n \times n)$ , kde  $n$  odpovídá počtu uzlů v grafu. Na pozici  $a_{ij}$  se nachází počet hran spojujících uzly  $x_i$  a  $x_j$ . Je-li graf neorientovaný, matice sousednosti bude symetrická podle diagonály.

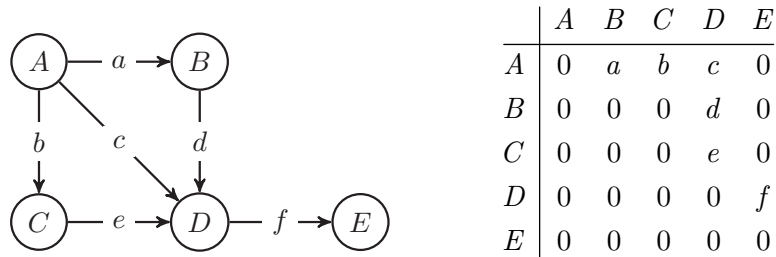


Obrázek 8: Příklad matice sousednosti neorientovaného grafu



Obrázek 9: Příklad matice sousednosti orientovaného grafu

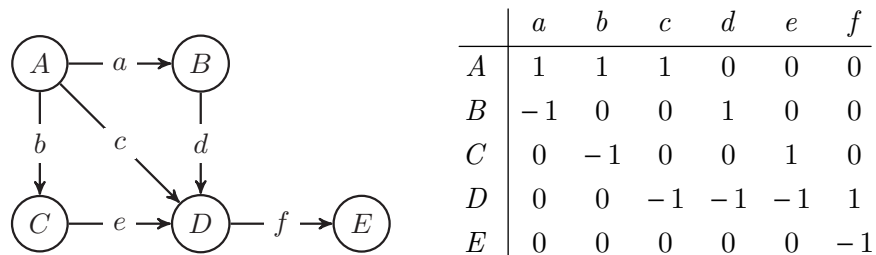
Za předpokladu že každá uspořádaná dvojice uzlů je spojena pouze jednou větví lze zavést tzv. *váženou matici sousednosti*, ve které se na pozici  $a_{ij}$  nachází váha přenosu z uzlu  $x_i$  do uzlu  $x_j$ ,



Obrázek 10: Příklad vážené matice sousednosti

### 3.2.5 Matice incidence

Podobně jako matice sousednosti je i incidenční matice dvourozměrná. Na jejích řádcích se vyskytují uzly a čísla ve sloupcích označují větve s daným uzlem spjaté. Je-li graf orientovaný, kladným číslem se označují hrany z uzlu vystupující a záporným hrany vstupující.



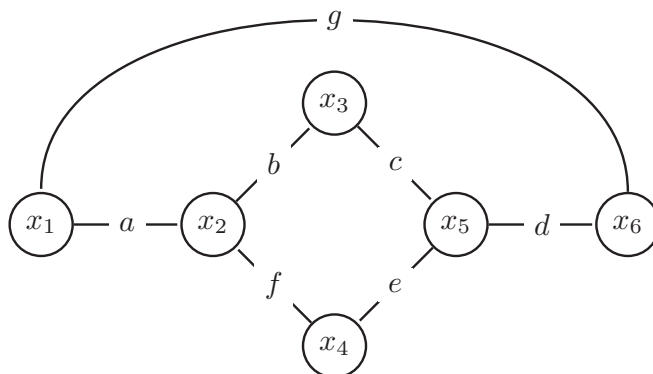
Obrázek 11: Příklad matice incidence

## 3.3 Dělení grafů

### 3.3.1 Neorientované

*Definice:* Neorientovaný graf je dvojice:  $G = \langle V | E \rangle$ , kde  $V$  je neprázdňá množina uzlů a  $E$  množina neuspořádaných uzlů, tzv. neorientovaných hran.

Takové grafy se hodí pro hledání optimální cesty v navigačních systémech, či minimalizaci nákladů výstavbových projektů.



Obrázek 12: Příklad neorientovaného grafu

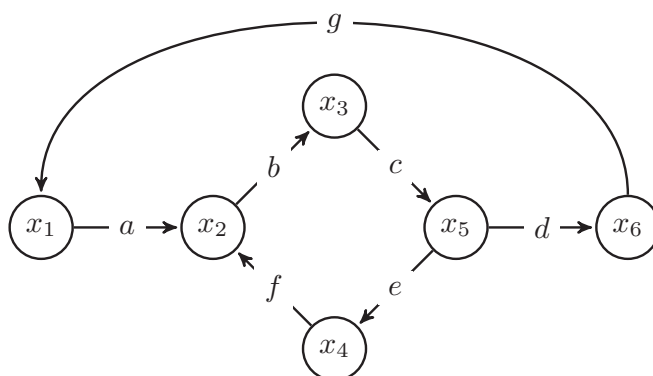
### 3.3.2 Orientované

*Definice:* Orientovaný graf je dvojice:  $G = \langle V | E \rangle$ , kde  $V$  je neprázdňá množina uzlů a  $E$  množina uspořádaných dvojic vrcholů, tzv. orientovaných hran.

V orientovaných grafech definujeme navíc tyto pojmy:

- Orientovaná větev – hrana grafu, u které je definován začátek a konec, v grafu se směr vyznačuje šipkou.
- Zřídlo – uzel, který není koncovým uzlem žádné větve.
- Nora – opak zřídla, tedy uzel, jenž není počátečním uzlem žádné větve.

Využití nachází v informatice pro popis toku dat, v elektrotechnice pro popis signálových toků a podobně.



Obrázek 13: Příklad orientovaného grafu

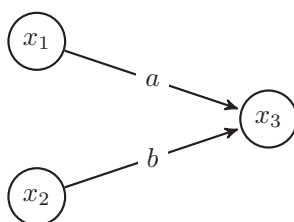
## 3.4 Práce s grafy

### 3.4.1 Pravidla pro práci s grafy

V úvodu této kapitoly je naznačeno, že při použití metody signálových toků orientovaný graf představuje matematickou rovnici. Elementárním příkladem může být rovnice:

$$x_3 = a \cdot x_1 + b \cdot x_2 \quad (3.1)$$

které by odpovídal graf:

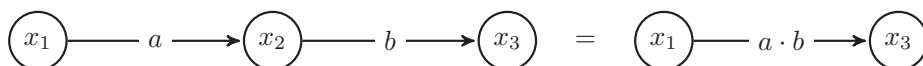


Obrázek 14: Základní přiřazení rovnice

Takto lze přiřadit grafy i k rozsáhlým souborům rovnic, v nichž můžeme přenosy najít pomocí následujících pravidel.

### 3.4.2 Postupné úpravy

- Přenos přímé cesty – pokud se podgraf skládá z několika po sobě jdoucích přímých cest, lze zjednodušit do jediné hrany s přenosem odpovídajícím součinu přenosů jednotlivých hran.



Obrázek 15: Přenos přímé cesty

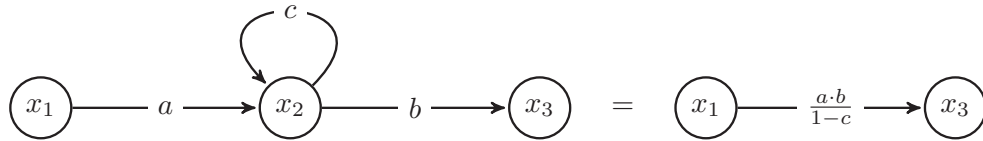
- Přenos paralelně řazených cest (stejně orientovaných) – podgraf skládající se z více paralelních větví se dá nahradit jedinou větví s přenosem odpovídajícím součtu přenosů jednotlivých hran.



Obrázek 16: Součet

- Odstranění vlastní smyčky – pokud se v grafu vyskytuje vlastní smyčka, znamená to, že se veličina, zapsaná daným uzlem vyskytuje na obou

stranách rovnice. Jejím vytknutím a poté vydělením obou stran rovnice ji převedeme na pravou stranu rovnice a tím odstraníme vlastní smyčku.



Obrázek 17: Odstranění vlastní smyčky

### 3.4.3 Masonovo pravidlo

Upravovat složité grafy pomocí postupného zjednodušování může být velmi pracné a časově náročné. Existuje přímý postup pro určení přenosu mezi dvěma libovolnými uzly a to Masonův vzorec.

Masonovo pravidlo je algoritmus pro sestavení přenosové rovnice za pomoci orientovaného grafu. Tuto metodu popsal Samuel Jefferson Mason ve své disertační práci na Massachusettském Institutu Technologie (MIT) v roce 1952 [6]. Sestává se z nalezení přímých cest v grafu, smyček prvního řádu, což jsou přímé cesty vycházející a končící ve stejném bodě, smyček vyšších řádů, což jsou  $k$ -tice smyček prvního řádu, které nesdílejí žádné uzly ( $k$  značí řád) a následující složení těchto prvků podle níže uvedeného vzorce.

$$T = \frac{x_{\text{out}}}{x_{\text{in}}} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i \cdot \Delta_i}{\Delta} \quad (3.2)$$

kde:  $T$  = přenos z uzlu  $x_{\text{in}}$  do uzlu  $x_{\text{out}}$

$n$  = počet přímých tras

$T_i$  = Přenos  $i$ -té přímé cesty

$\Delta_i = 1 -$  (součet smyček prvního řádu nesouvisejících s  $i$ -tou trasou) + (součet smyček druhého řádu nesouvisených s  $i$ -tou trasou) - (součet smyček třetího řádu...)

$\Delta = 1 -$  (součet smyček prvního řádu) + (součet smyček druhého řádu) - (součet smyček třetího řádu) - ... [6]

Například přenos z uzlu č. 1 do uzlu č. 6 orientovaného grafu na obrázku č. 12 obsahuje jednu přímou cestu:  $T_1 = a \cdot b \cdot c \cdot d$ , dvě smyčky prvního řádu:  $\Delta_1 = b \cdot c \cdot e \cdot f$ ,  $\Delta_2 = a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot g$  a žádné smyčky vyšších řádů, tudíž výsledný přenos se dá spočítat podle vztahu:

$$T = \frac{x_6}{x_1} = \frac{abcd}{1 - (bcef + abcdg)} \quad (3.3)$$

## 4 Vlastní programové řešení

Práce na tomto bakalářském projektu započala již v předmětu „Individuální projekt 2“, jehož cílem byl návrh algoritmu hledání přímých cest, smyček a sestavení Masonova pravidla z údajů o orientovaném grafu pevně daných textovým souborem. Tento algoritmus byl realizován v programovacím prostředí MATLAB a jeho výstupem byl textový řetězec obsahující přenosovou funkci v obecném tvaru.

V rámci předmětu „Bakalářská práce“ bylo třeba implementovat tento algoritmus do programu, ve kterém by si uživatel vybral prvky, z nichž se analyzovaný obvod skládá, zadal či změnil předem vyplněné hodnoty s-parametrů a pospojoval jednotlivé brány. Program by po výběru výchozí a koncové brány sestavil Masonův vzorec, dosadil do něj zadané hodnoty a spočítal přenosovou funkci.

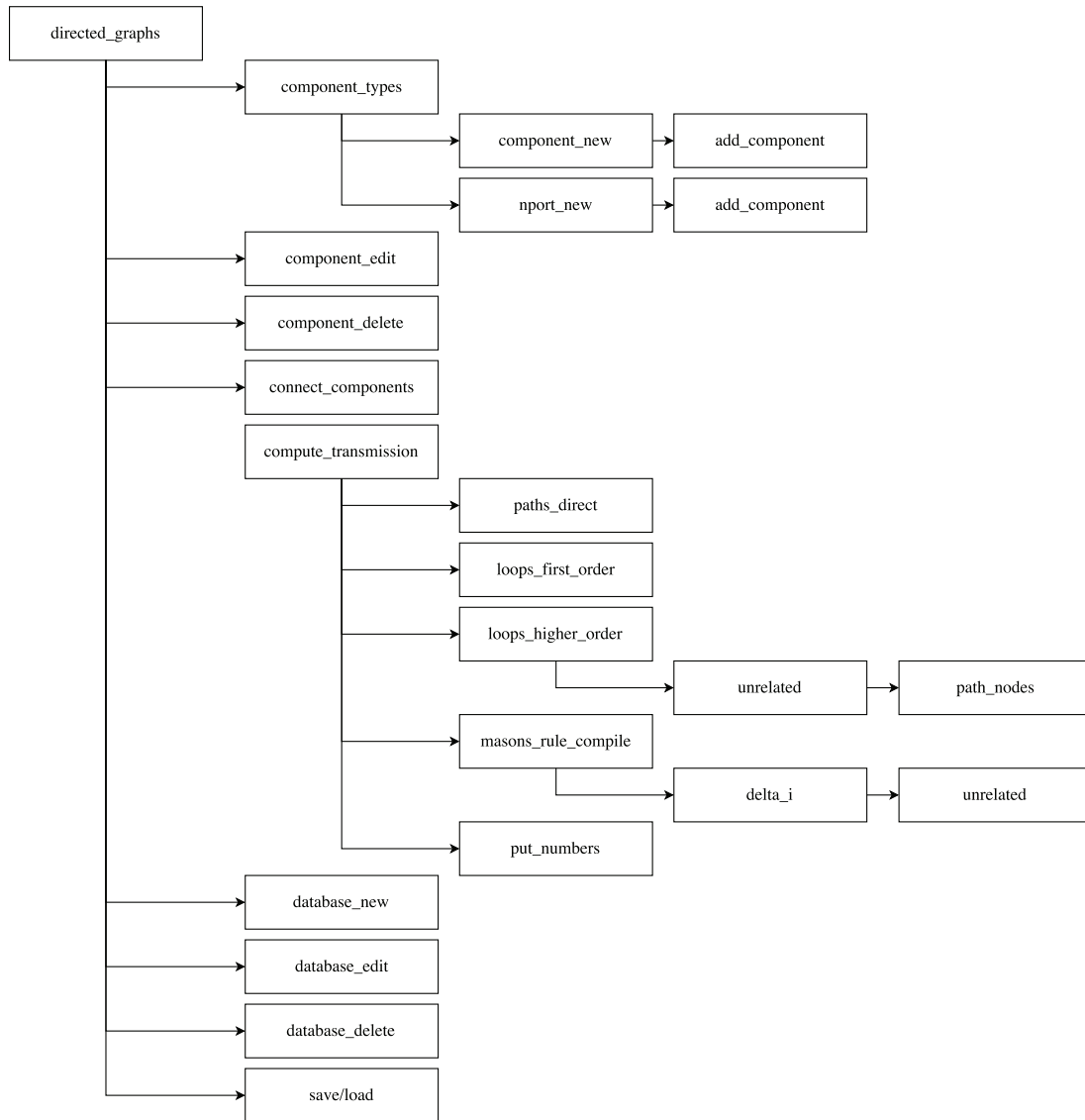
### 4.1 Zvolené programovací prostředí

MATLAB (matrix laboratory) je interaktivní programové prostředí a skriptovací programovací jazyk čtvrté generace. Program MATLAB je vyvíjen společností MathWorks. Je určen pro vědeckotechnické účely, simulace, paralelní výpočty apod. Zahrnuje výpočty, vizualizaci a programování do uživatelsky ovladatelného prostředí. [4]

### 4.2 Struktura programu

Program je rozdělen do několika funkcí. Na obrázku č. 18 je naznačena struktura „Programu pro analýzu mikrovlnných obvodů“. V následujících podkapitolách je popsána jejich funkce.





Obrázek 18: Struktura programu

## 4.3 Algoritmizace a implementace

### 4.3.1 Reprezentace grafu v programu

V navrženém programu je orientovaný graf vždy reprezentován váženou maticí sousednosti. Důvodů proč je zvolena právě tato varianta, je několik. Jedním z nich je výše zmíněné programovací prostředí, které je přímo stavěné pro práci s maticemi. Hlavním důvodem je ovšem fakt, že rozptylové parametry jsou vlastně malé matice sousednosti, jejichž členy  $s_{ij}$  vyjadřují, jak se napěťová vlna vstupující do brány  $j$  v mnohobranu transformuje na vlnu vystupující z brány  $i$ . a tudíž jsou přímo podgrafem orientovaného grafu popisujícího analyzovaný obvod.

Každé bráně jsou přiřazeny dva uzly:  $a_x$  pro vstupující vlnu a  $b_x$  pro vlnu vystupující. Ve výsledné celkové matici se střídají podle vzoru:  $a_1, b_1, a_2, b_2, \dots, a_x, b_x$ . kde  $x$  je počet bran.

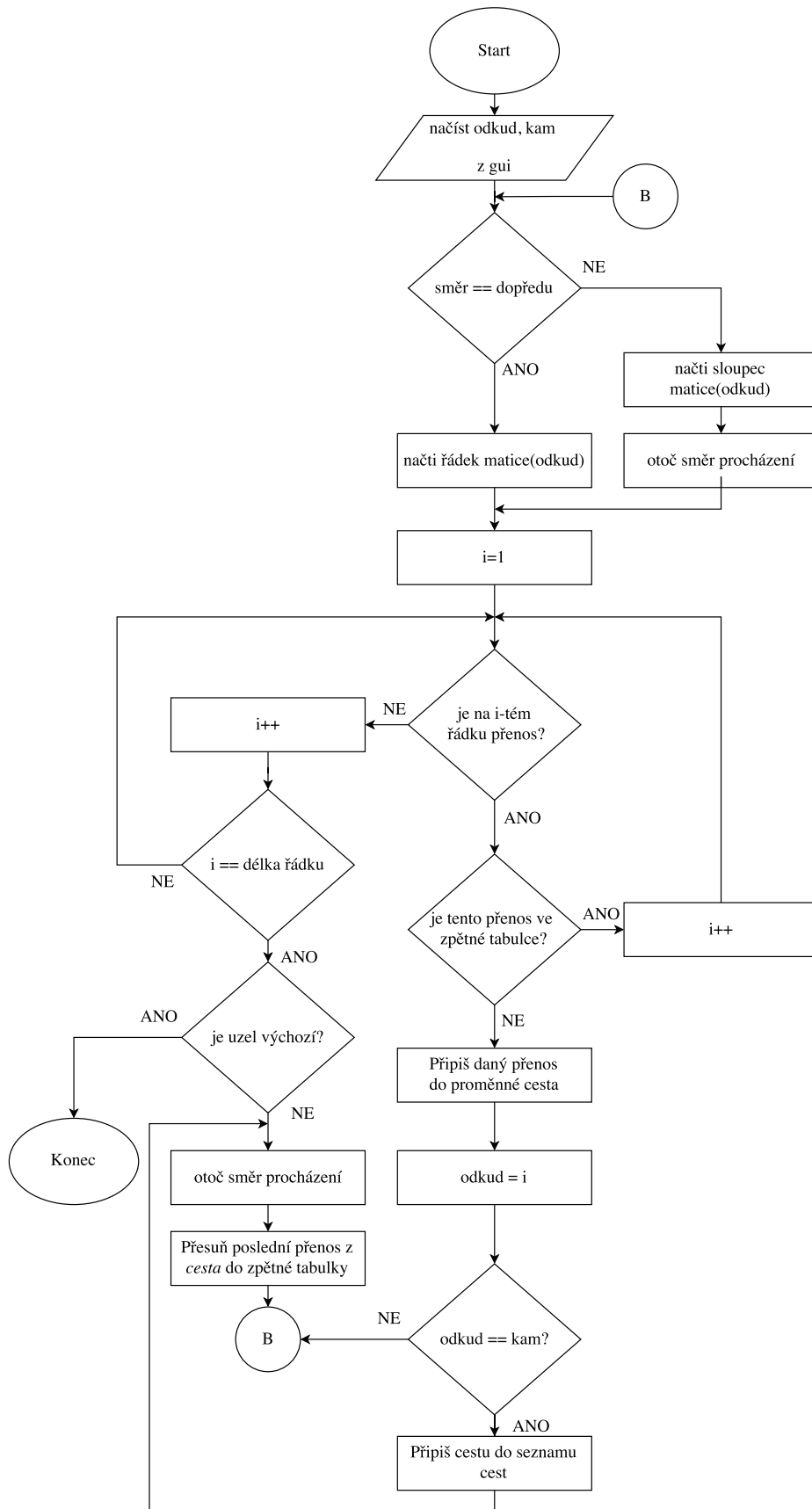
Například dva kaskádně spojené dvojbrany  $X$  a  $Y$  by v programu byly zapsány následovně:

	$a_1$	$b_1$	$a_2$	$b_2$	$a_3$	$b_3$	$a_4$	$b_4$
$a_1$	0	$Xs_{11}$	0	$Xs_{12}$	0	0	0	0
$b_1$	0	0	0	0	0	0	0	0
$a_2$	0	$Xs_{21}$	0	$Xs_{22}$	0	0	0	0
$b_2$	0	0	0	0	1	0	0	0
$a_3$	0	0	0	0	0	$Ys_{11}$	0	$Ys_{12}$
$b_3$	0	0	1	0	0	0	0	0
$a_4$	0	0	0	0	0	$Ys_{21}$	0	$Ys_{22}$
$b_4$	0	0	0	0	0	0	0	0

Vnitřní s-parametry se tedy nacházejí vždy na lichých řádcích a propojení prvků obvodů se nachází na řádcích sudých. O sestavení matice sousednosti z jednotlivých s-parametrů se stará funkce *create\_adjacency\_matrix*.

### 4.3.2 Průchod grafem

Algoritmus pro hledání cest v grafu je vysvětlen na následujícím vývojovém diagramu:

Obrázek 19: Vývojový diagram funkce `paths_direct`

Do funkce *paths\_direct* vstupuje matice sousednosti, číslo uzlu ze kterého hledáme cestu a číslo uzlu ve kterém chceme skončit.

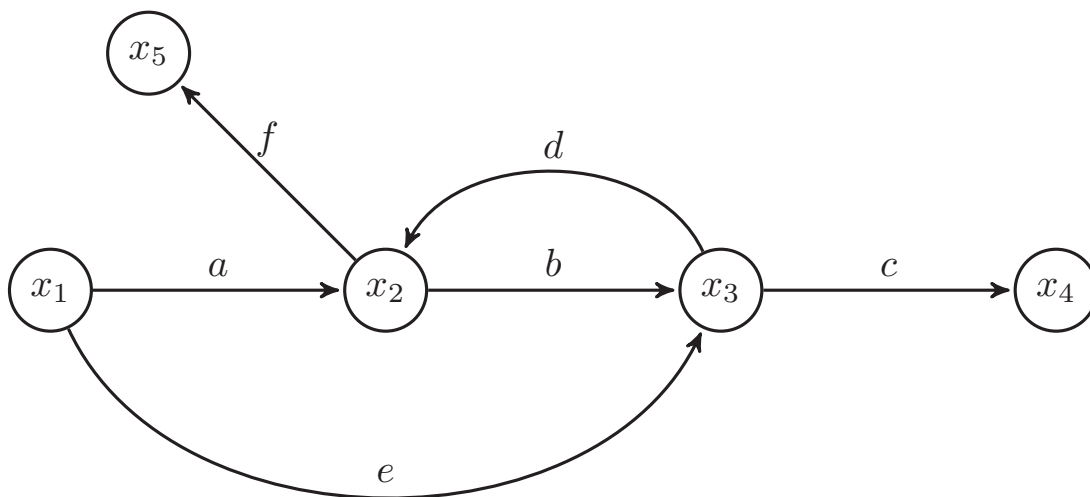
Program z matice vždy vybere celý řádek s indexem *from* a ten se poté prochází zleva doprava, najde-li se nějaký nenulový přenos (který není ve zpětné tabulce), zapíše se do proměnné *cell\_path*. Do proměnné *from* se poté uloží koncový uzel nalezeného přenosu. To se opakuje, dokud se obsah proměnných *from* a *to* nerovná. V takovém případě se *cell\_path* zapíše do seznamu *cell\_paths*.

Je třeba kontrolovat, aby algoritmus vyřadil uzly, které již navštívil, jinak by cesta nebyla přímá. K tomu slouží pole logických proměnných *visited*. Při průchodu uzlem se v poli *visited* změní příslušná hodnota z *false* na *true*. Uzly u kterých je hodnota *true* se poté ignorují.

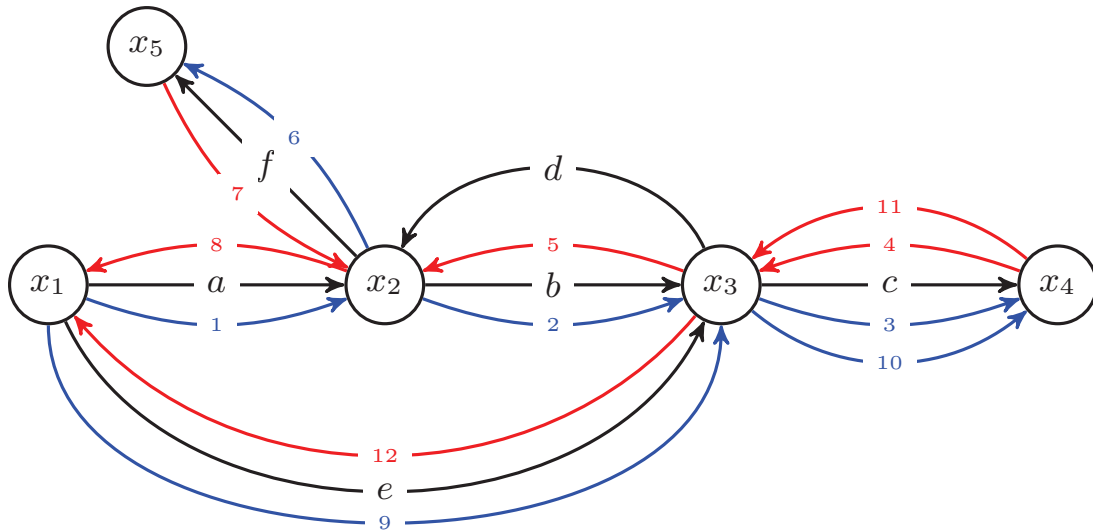
Poté co je přímá cesta uložena do seznamu *cell\_paths*, nebo pokud se program octne „ve slepé uličce“, otočí se směr průchodu maticí a přenosy se zapisují do tzv. zpětné tabulky, která zajišťuje, aby program nehledal stále stejnou cestu dokola. Zároveň se při couvání maže poslední přenos v proměnné cesta. Podobná situace nastává, pokud řádek neobsahuje žádný přenos. Opačným směrem prochází program vždy jen o jednu větev zpátky, poté se opět načte řádek a kontrolují další přenosy.

Tento průchod grafem skončí tak, že se program opět ocitne ve výchozím uzlu. Protože všechny hrany jsou již ve zpětné tabulce, přeruší se nekonečný cyklus a funkce vrátí seznam *cell\_paths*.

Pro ilustraci je na obrázku č. 21 rozkreslen průchod grafem při hledání přímých cest z uzlu  $x_1$  do uzlu  $x_4$ . Modře je vyznačen směr průchodu kupředu, červeně pozpátku.



Obrázek 20: Ukázkový graf



Obrázek 21: Znárodnění průchodu grafem

### 4.3.3 Hledání smyček

- Prvního řádu

Protože smyčka prvního řádu je vlastně přímá cesta z jednoho uzlu do toho samého, stačí pro každý uzel zavolat funkci *paths\_direct*. Smyčky o  $n$  uzlech tímto způsobem nalezneme  $n$ -krát, pouze různě seřazené. V programu jsou tyto duplicity odstraněny tak, že přenosy jsou ve smyčce seřazeny podle unicode tabulky a poté porovnávány mezi sebou. Pouze ty jedinečné jsou zachovány. Ve výsledku tedy přenosy ve smyčkách nejdou po sobě tak jako v orientovaném grafu, z matematického hlediska to nicméně nevádí.

Také je důležité neoznačovat výchozí uzel ve funkci *paths\_direct* jako navštívený, jinak by ho algoritmus pro hledání přímých cest ignoroval a smyčka by se nemohla uzavřít.

- Vyšších řádů

Smyčky druhého řádu, jsou dvojice smyček prvního řádu, jenž spolu nesouvisí. Smyčky třetího řádu jsou trojice smyček prvního řádu, jenž spolu nesouvisí a tak dále. Nejvyšší možný řád smyček je tedy roven počtu smyček prvního řádu, za předpokladu že jsou všechny nezávislé.

Funkce *loops\_higher\_order* je uzavřena ve *for* cyklu, kde počet iterací je roven počtu smyček prvního řádu. Počet všech  $n$ -tic je z matematického hlediska roven počtu kombinací bez opakování. Poté je třeba porovnat, zda spolu nesouvisí. K tomu slouží funkce *path\_nodes*, která podle listu spojení najde k přenosům příslušné uzly a ty jsou poté porovnávány. Pokud se žádný uzel nerovná, zapíše smyčka do seznamu *cell\_loops\_higher\_order*.

### 4.3.4 Sestavení vzorce podle Masonova pravidla

Funkce *asons\_rule\_compilation* je rozdělena do dvou hlavních podčástí a to sestavení čitatele a sestavení jmenovatele.

Sestavení čitatele probíhá v několika cyklech s pevně daným počtem opakování. Prochází se jednotlivé přímé cesty a u každé se hledají nesouvisející smyčky všech možných řádů. K tomu slouží již jednou použitá funkce *path\_nodes*. Podle toho zda je řád sudý nebo lichý se vybere znaménko plus či minus. Poté co jsou nalezeny dané smyčky, volá se funkce *convert\_to\_string*, která z buňky vytvoří textový řetězec.

Jmenovatel je o něco jednodušší protože obsahuje veškeré smyčky v obvodu a to podle pravidla popsaného v kapitole 3. Stačí tedy zavolat *convert\_to\_string* na celou buňku *cell\_loops\_higer\_order*.

Pokud jsou smyčky označeny jako závislé, vrací podfunkce nuly. Ty jsou sice z matematického hlediska korektní, nicméně zápis:

```
s23*r2*s42 * (1 - 0 + 0 - 0 + 0)
```

je zbytečný a proto se volá funkce *zeros\_delete*, která tyto redundance odstraní.

Nakonec se pouze spojí proměnné *numerator* a *denominator* do jedné proměnné *asons\_rule*, která je výstupem funkce.

### 4.3.5 Dosazení do vzorce

Až potud program sestavuje Masonův vzorec obecně a jednotlivé proměnné jsou v sestavené přenosové funkci pojmenovány *%i%*, kde *i* je index přenosu v matici sousednosti. Funkce *put\_numbers* na místo těchto proměnných dosadí numerické hodnoty a poté pomocí funkce *eval* spočítá výsledný přenos.

### 4.3.6 Další funkce

*unrelated* – určuje, zda vstupní trasy nemají společný uzel.

*delta\_i* – sestavuje součet smyček nesouvisejících s příamou trasou *i*.

*info* – zobrazí informace o právě vybraném prvku.

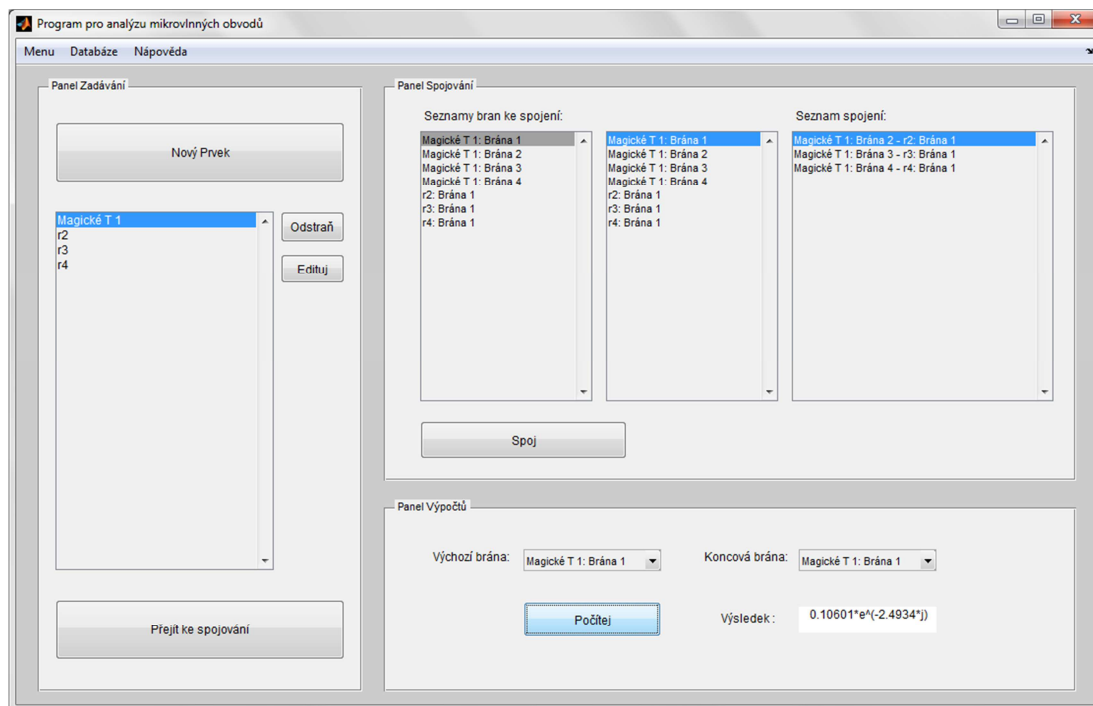
*help* – zobrazí okno nápovědy.

## 4.4 Návrh uživatelského rozhraní

Při návrhu uživatelského rozhraní je třeba postupovat tak, aby se i neseznámený uživatel v programu vyznal. V tomto případě se tedy staví na principech systému Microsoft Windows jako je rozdělení do oken, standardní klávesové zkratky, lišta nabídek, bublinová nápověda při podržení myši nad objektem a podobně.

V následujících podkapitolách jsou popsány součásti „Programu pro analýzu mikrovlnných obvodů“.

### 4.4.1 Hlavní okno



Obrázek 22: Hlavní okno programu

Hlavní okno je rozděleno do čtyř sekcí: Lišta nabídek, Panel zadávání, Panel spojování a Panel výpočtů.

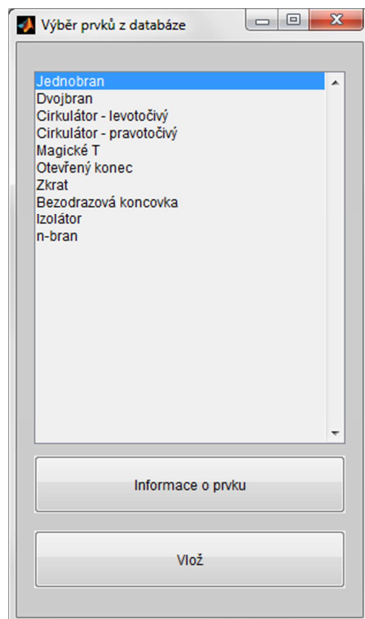
Na liště nabídek se nachází nabídka menu, která slouží pro ukládání, načítání, tvorbu nového obvodu a ukončení programu. Nabídka databáze obsahuje možnosti pro přidávání, úpravy a odebírání prvků.

Panel zadávání slouží k výběru všech prvků, ze kterých se analyzovaný obvod bude skládat. Při stisku tlačítka "Nový prvek" se otevře seznam dostupných součástí, které je poté možné dále upravovat a vkládat. Po dokončení výběru součástí obvodu se stiskem tlačítka „Přejít k propojování“ na pozadí programu vygeneruje vážená matice sousednosti celého orientovaného grafu. Zároveň se aktivuje možnost spuštění výpočtu přenosové funkce.

K sestavení samotného obvodu z nadefinovaných prvků slouží panel Spojování. Propojení se realizuje výběrem dvojice bran a stiskem tlačítka „Vytvořit spojení“,

Panel výpočtů se skládá ze dvou nabídek a tlačítka „Počítej“, kterým se spustí výpočet přenosové funkce z vybrané výchozí brány do vybrané koncové brány.

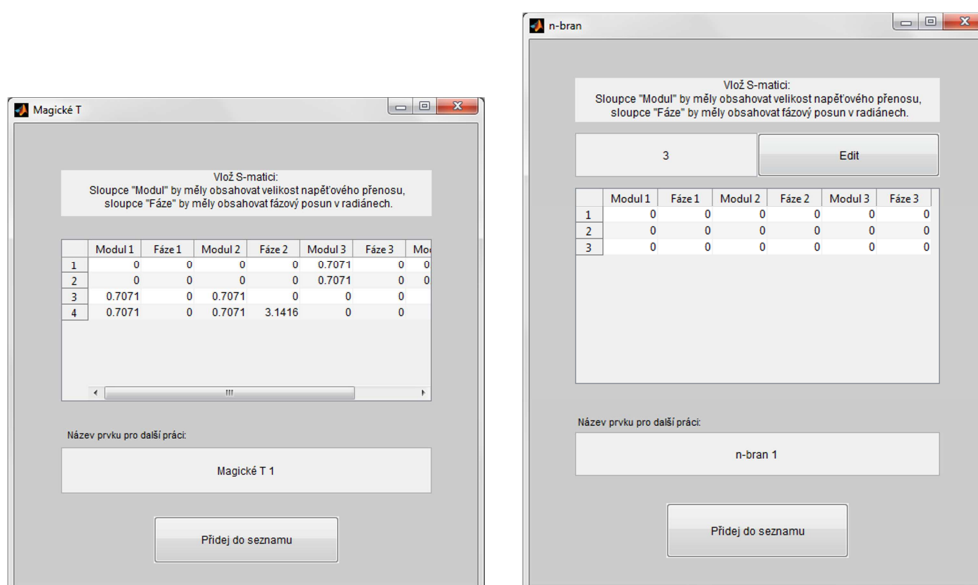
### 4.4.2 Výběr prvků



Obrázek 23: Výběr prvku

Okno výběr prvku zobrazí přehled všech možných součástí, které jsou v databázi (databáze je podrobněji popsána v kapitole 4.3) a speciálního prvku  $n$ -bran, u kterého, jak už je z názvu patrné, může uživatel definovat  $s$ -parametry  $n$  rozměrného mnohobranu. Stiskem tlačítka „Vlož“ se přejde k editaci vkládaného objektu.

### 4.4.3 Okno zadávání



Obrázek 24: Zadávání parametrů vkládaného prvku



Okno zadávání obsahuje stručný návod, editovatelnou tabulku, textové pole a vkládací tlačítko.

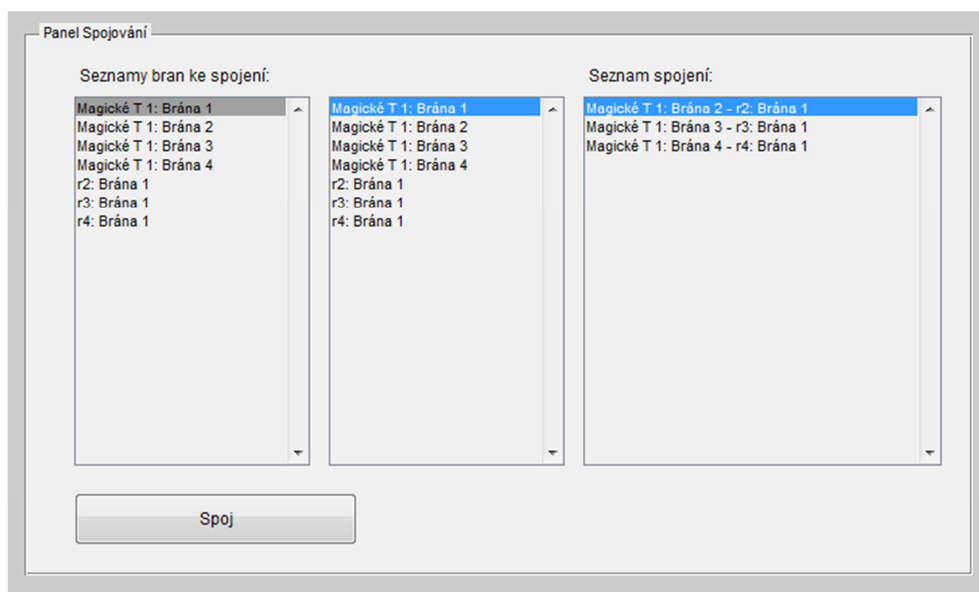
Matlab obsahuje funkci *uitable*, která do uživatelského rozhraní vloží zadávací tabulku. S-parametry jsou komplexní matice, ale *uitable* umí pracovat s komplexními čísly pouze v algebraickém tvaru. Ten se pro vyjádření rozptylových parametrů nehodí tak jako tvar exponenciální. Proto je pro zadávání využít dvojnásobný počet sloupců než řádků a střídá se zadávání modulů a fází. Fáze se zadává v radiánech, jak je tomu v technické praxi zvykem.

Při vkládání více prvků stejného druhu jsou sice položky v seznamu označeny různými čísly, ale ve větších počtech klesá přehlednost. Proto je v okně zadávání textové pole, kde si může uživatel přejmenovat prvek podle sebe.

Mírně odlišné rozhraní má obecný prvek  $n$ -bran. Na rozdíl od předdefinovaných prvků obsahuje ještě pole pro zadání rozměru rozptylové matice.

Po stisku tlačítka „Přidej do seznamu“ se na pozadí přidá navržená s-matice do buňky *data*, ze které se později sestavuje matice sousednosti.

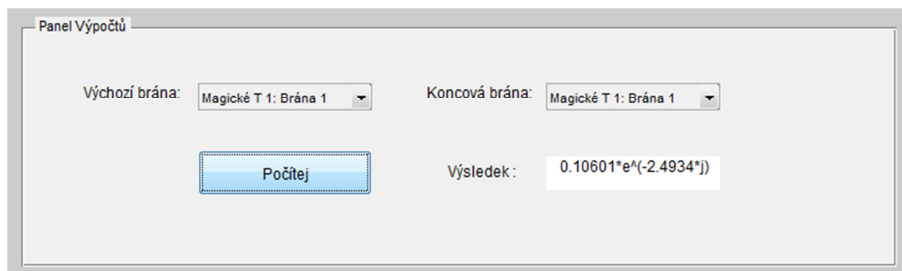
#### 4.4.4 Spojování



Obrázek 25: Panel spojování

Panel spojování obsahuje celkem tři seznamy. V prvních dvou se nachází výčet všech bran odpovídajících seznamu prvků vložených uživatelem. Jednoduchým výběrem dvou různých bran a stiskem tlačítka „Vytvořit spojení“ se v seznamu spojení objeví jejich propojení. Na pozadí se do matice sousednosti přidá jednotkový přenos na příslušné pozice, tedy přibudou dvě orientované větve grafu mezi výstupy a vstupy zvolených bran.

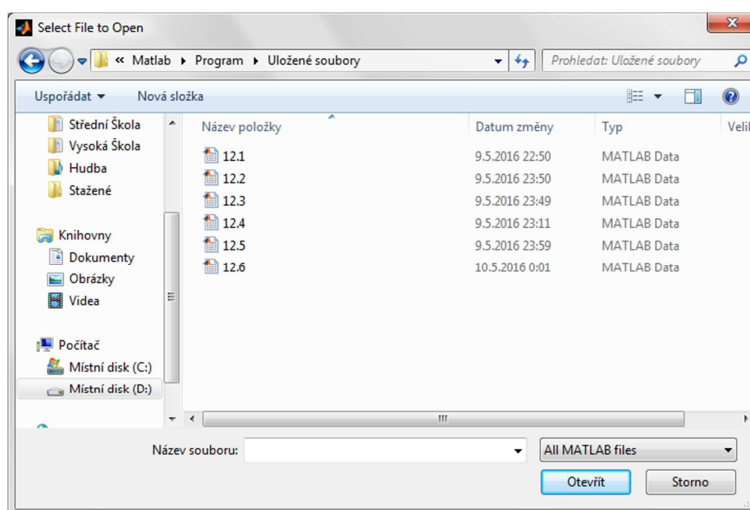
### 4.4.5 Výpočet přenosu



Obrázek 26: Panel výpočtů

Co se rozhraní týče, obsahuje panel výpočtů dvě rolovací nabídky se seznamem bran, tlačítko a needitovatelné textové pole, ve kterém se zobrazuje výsledná hodnota. Tlačítkem „Počítej“ se spustí výpočet přenosu z výchozí do koncové brány.

### 4.4.6 Ukládání / Načítání



Obrázek 27: Dialog pro ukládání, načítání

Jako je tomu u všech počítačových editorů současnosti i v tomto programu je možnost uložení rozdělané práce a její pozdější načtení.

V nabídce menu uživatel výběrem možnosti „Ulož obvod“ zavolá funkci *file\_save*, která shromáždí veškerá potřebná data do souboru a poté využije schopnosti Matlabu otevřít standardní ukládací dialogové okno ve kterém uživatel vybere kam a pod jakým názvem se data uloží.

Funkce *file\_load* je vlastně převrácenou funkcí *file\_save*. Uživatel vybere uložený soubor pomocí dialogového okna a poté jsou načtená data interpretována jako rozdělaný projekt.

## 4.5 Databáze

V předchozí části textu bylo zmíněno, že lze vybírat různé mikrovlnné prvky z databáze. Tu v tomto programu zastupuje matice *database* uložená v souboru *database.mat*. Počet jejích řádků odpovídá počtu uložených prvků a každý řádek je rozdělen na čtyři sloupce. V prvním se nachází název konkrétní součástky, ve druhém její rozptylová matice, třetí obsahuje počet výskytů daného prvku v právě editovaném obvodu a poslední řádek obsahuje textový řetězec s informacemi o dané komponentě.

Ve výchozím stavu obsahuje databáze následující mikrovlnné mnohobraný:

*Obecný jednobran, zkrat, otevřený konec, bezodrazovou koncovku, obecný dvojbran, izolátor, cirkulátor, a magické T.*

Obsah databáze lze rozšiřovat, editovat či promazávat pomocí druhého odkazu na liště nabídek.

### 4.5.1 Úprava databáze

Vlož S-matici:  
Sloupce "Modul" by měly obsahovat velikost napětového přenosu,  
sloupce "Fáze" by měly obsahovat fázový posun v radiánech.

3 Edit

	Modul 1	Fáze 1	Modul 2	Fáze 2	Modul 3	Fáze 3
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0

Zde napiš jméno součástky

Zde napiš informace k dané součástce

Přidej prvek do databáze

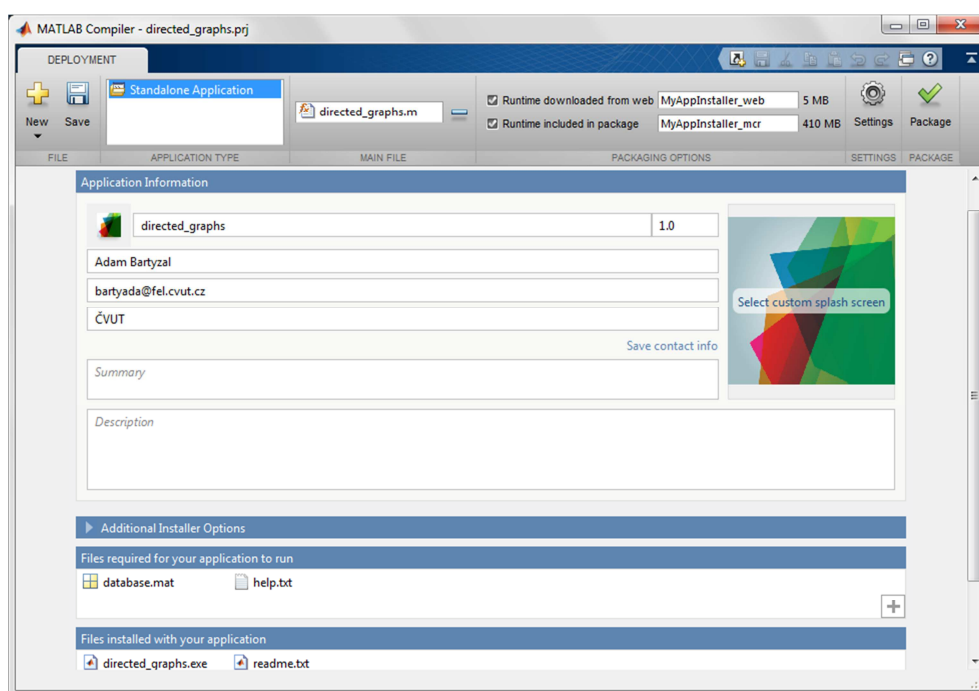
Obrázek 28: Přidání prvku do databáze

Nový prvek, či úprava existujícího probíhá v okně velice podobném přidávání  $n$ -branu. Liší se pouze v textovém poli, které slouží k vložení informací o dané součástce.

## 4.6 Finální podoba

Dokud zůstává program ve formě funkce, je třeba disponovat prostředím Matlab pro její spuštění. Matlab obsahuje vestavěný kompilátor *Matlab Compiler*, který dokáže z „.m“ souboru vytvořit spustitelný „.exe“ soubor. I přes to je k jeho spuštění potřeba mít nainstalovanou knihovnu *Matlab runtime*, která je na rozdíl od programovacího prostředí k dispozici zdarma a při kompilaci jí lze vložit do výsledného souboru.

Určitou nevýhodou tohoto řešení mohou být vyšší nároky na operační paměť. Před samotným spuštěním programu si Matlab runtime alokuje zhruba 100 MB RAM, i přes to že zdrojový kód i všechny používané proměnné nepřesahují řádově kilobyty.



Obrázek 29: Prostředí Matlab Compiler

Další problém nastává při snaze spustit aplikaci vygenerovanou pomocí stroje s 64bitovým operačním systémem na počítači, jehož systém je založen pouze na 32bitové architektuře.

Řešení tohoto problému lze nalézt na webu [7]. Spočívá v instalaci 32bitové verze programovacího prostředí Matlab a spuštění kompilátoru se sérií příkazů, která přinutí překladač pracovat s poloviční délkou slova.

## 5 Testování

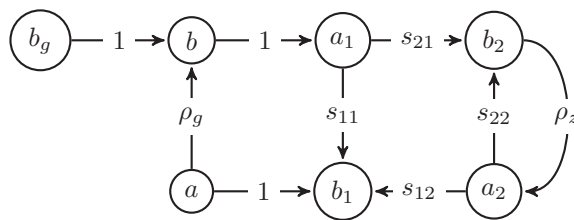
Součástí zadání bakalářské práce je testování sepsaného programu pomocí příkladů ze skript [1]. Metodě orientovaných grafů je zde věnována kapitola 12, obsahující 6 modelových příkladů a jejich obecné řešení. Protože ale program vyžaduje ke správné funkci zadané numerické hodnoty, jsou u každého příkladu prvkům přiřazeny rozptylové parametry, které by mohly mít skutečné obvody.

### 5.1 Příklad 12.1

*Zadání:* Nakreslete orientovaný graf kaskádního spojení generátoru, obecného dvoubranu a zátěže. Určete přenos  $T = \frac{b_2}{b_g}$ . [1]

Hodnoty:

$$\varrho_g = 0.1 e^{j0,3}, \varrho_z = 0.2 e^{j2,2}, \mathbf{S}_{dvoj} = \begin{bmatrix} 0,2 e^{j3,14} & 0,9 e^{j0,5} \\ 0,9 e^{j0,5} & 0,2 e^{j3,14} \end{bmatrix}.$$



Obrázek 30: Orientovaný graf obvodu 12.1

Po dosazení hodnot do vztahu z [1] vyjde číselná hodnota přenosu:

$$T = \frac{b_2}{b_g} = \frac{s_{21}}{1 - s_{11}\varrho_g - s_{22}\varrho_z - s_{21}s_{12}\varrho_g\varrho_z + s_{11}\varrho_g s_{22}\varrho_z} = 0.890 e^{j(0.456)} \quad (5.1)$$

Po analýze obvodu navrženým programem dostaneme stejný výsledek:

Výchozí brána:       Koncová brána:

     Výsledek:

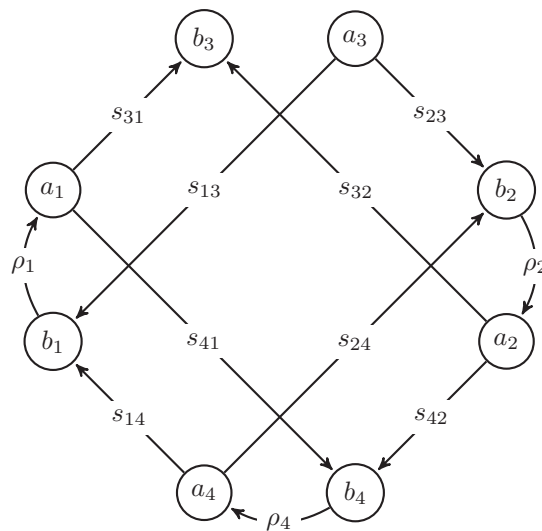
Obrázek 31: Příklad 12.1 spočítaný programem

## 5.2 Příklad 12.2

*Zadání:* Sestrojte orientovaný graf ideálního magického T, které je napájeno do brány č. 3, a vypočtete přenos z brány č. 3 do brány č. 4. K branám č. 1, 2 a 4 jsou připojeny zátěže s činiteli odrazu  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$ . [1]

Hodnoty:

$$\rho_1 = 0.2e^{j0.3}, \rho_2 = 0.3e^{j2.7}, \rho_4 = 0.25e^{j5.1}, \mathbf{S}_{magt} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$



Obrázek 32: Orientovaný graf obvodu 12.2

$$T = \frac{s_{23}\rho_2s_{42} + s_{13}\rho_1s_{41}}{1 - \rho_4(\rho_1s_{41}s_{14} + \rho_2s_{42}s_{24})} = 0,238 e^{j(-0,130)} \quad (5.2)$$

Výchozí brána:       Koncová brána:

     Výsledek:

Obrázek 33: Příklad 12.2 spočítaný programem

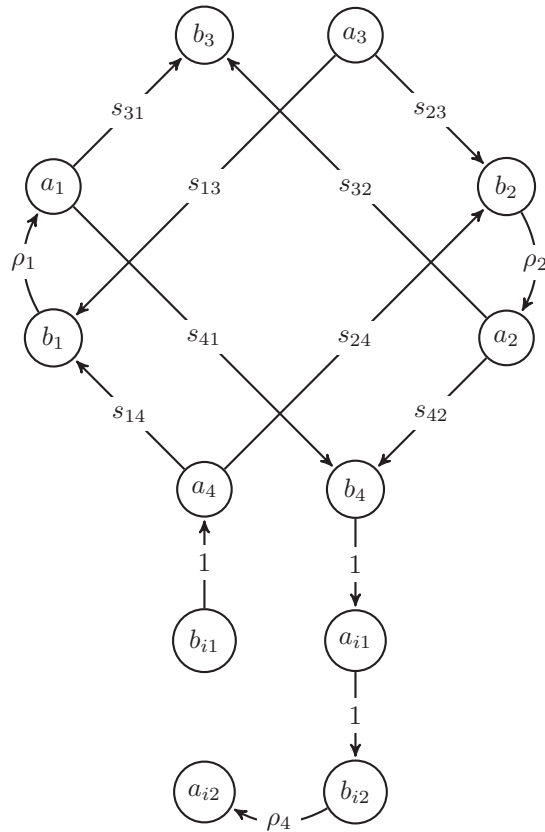
### 5.3 Příklad 12.3

*Zadání:* Sestrojte orientovaný graf ideálního magického T, které je napájeno do brány č. 3, a vypočítejte přenos z brány č. 3 do brány č. 4, je-li zátěž připojena k bráně č. 4 přes izolátor. K branám č. 1, 2 a 4, jejichž činitele odrazu mají hodnoty  $\varrho_1, \varrho_2, \varrho_3$ . [1]

Hodnoty:

$$\varrho_1 = 0.2 e^{j0.3}, \varrho_2 = 0.3 e^{j2.7}, \varrho_3 = 0.25 e^{j5.1}, \mathbf{S}_{\text{magt}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{S}_{\text{izo}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$



Obrázek 34: Orientovaný graf obvodu 12.3

$$T = s_{23} \varrho_2 s_{42} + s_{13} \varrho_1 s_{41} = 0.233 e^{j(-0.158)} \quad (5.3)$$

Výchozí brána:	Magické T 1: Brána 3	Koncová brána:	Magické T 1: Brána 4
<input type="button" value="Počítej"/>		Výsledek:	0.23372*e <sup>-0.14839*j</sup>

Obrázek 35: Příklad 12.3 spočítaný programem

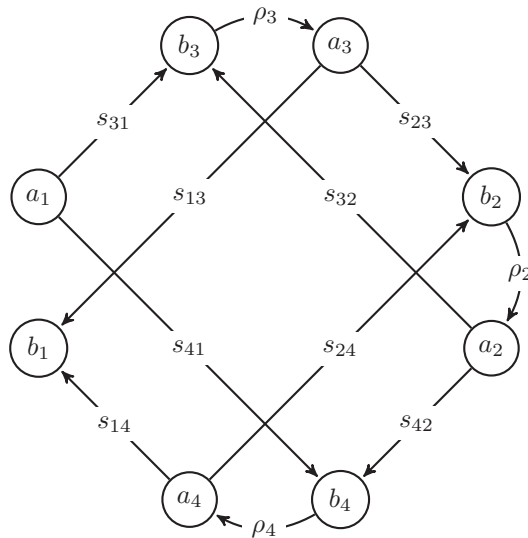
## 5.4 Příklad 12.4

*Zadání:* Určete činitele odrazu na bráně č. 1 ideálního magického T, jsou-li k branám č. 2, 3 a 4 připojeny zátěže činitelé odrazu  $\varrho_2$ ,  $\varrho_3$ ,  $\varrho_4$ . [1]



Hodnoty:

$$\varrho_2 = 0.2e^{j0.3}, \varrho_3 = 0.3e^{j2.7}, \varrho_4 = 0.25e^{j5.1}, \mathbf{S}_{\text{magt}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$



Obrázek 36: Orientovaný graf obvodu 12.4

$$T = \frac{s_{31}\varrho_3s_{13}(1 - s_{24}\varrho_2s_{42}\varrho_4) + s_{41}\varrho_4s_{14}(1 - s_{23}\varrho_2s_{32}\varrho_3)}{1 - s_{23}\varrho_2s_{32}\varrho_3 - s_{24}\varrho_2s_{42}\varrho_4} + \frac{s_{31}\varrho_3s_{23}\varrho_2s_{42}\varrho_4s_{14} + s_{42}\varrho_4s_{24}\varrho_2s_{32}\varrho_3s_{13}}{1 - s_{23}\varrho_2s_{32}\varrho_3 - s_{24}\varrho_2s_{42}\varrho_4} = 0.106 e^{j(-2.493)} \quad (5.4)$$

Výchozí brána:	Magické T 1: Brána 1	Koncová brána:	Magické T 1: Brána 1
Počítej		Výsledek:	0.10601*e <sup>-2.4934*j</sup>

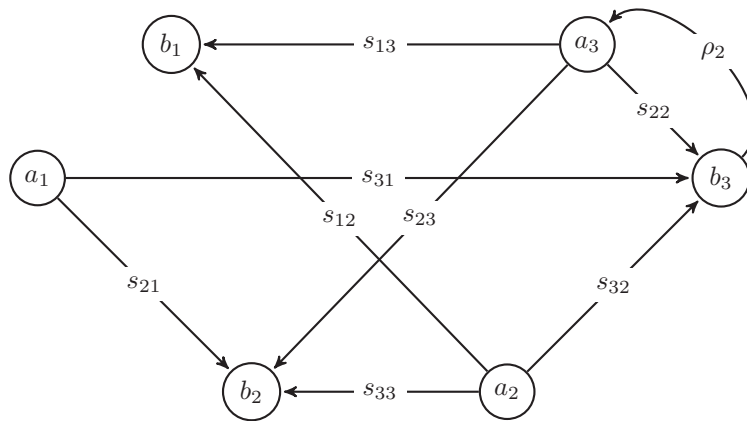
Obrázek 37: Příklad 12.4 spočítaný programem

## 5.5 Příklad 12.5

*Zadání:* Mikrovlnný trojbran je napájen do brány č. 1, která je impedančně přizpůsobena. Výstup je z brány č. 3 do impedančně přizpůsobené zátěže. K bráně č. 2 je připojena zátěž o činiteli odrazu  $\rho_2$  určete přenos mezi branami č. 1 a 3. [1]

Hodnoty:

$$\rho_1 = 0.2 e^{j0.3}, \mathbf{S}_{\text{troj}} = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{2} & \sqrt{2} \\ \sqrt{2} & 1 & -1 \\ \sqrt{2} & -1 & 1 \end{bmatrix}.$$



Obrázek 38: Orientovaný graf obvodu 12.5

$$T = s_{31} + \frac{s_{21}\rho_2 s_{32}}{1 - s_{22}\rho_2} = 0.634 e^{j(-0.040)} \quad (5.5)$$

Výchozí brána:	Trojbran: Brána 1	Koncová brána:	Trojbran: Brána 3
<input type="button" value="Počítej"/>		Výsledek:	0.63376*e <sup>-0.040274*j</sup>

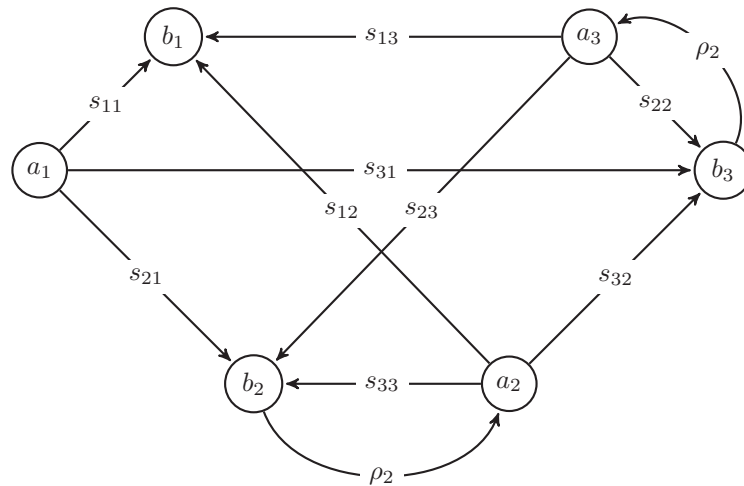
Obrázek 39: Příklad 12.5 spočítaný programem

## 5.6 Příklad 12.6

*Zadání:* Mikrovlnný trojbran je napájen do brány č. 1. K branám č. 2 a 3 jsou připojeny zatěžovací impedance. Které na vstupech těchto bran způsobí činitele odrazu  $\rho_2$  a  $\rho_3$ . Určete, jaký bude činitel odrazu na vstupu brány č. 1. [1]

Hodnoty:

$$\rho_2 = 0.2 e^{j0,3}, \rho_3 = 0.5 e^{j2,6}, \mathbf{S}_{\text{troj}} = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{2} & \sqrt{2} \\ \sqrt{2} & 1 & -1 \\ \sqrt{2} & -1 & 1 \end{bmatrix}.$$



Obrázek 40: Orientovaný graf obvodu 12.6

$$T = \frac{s_{11}(1 - s_{22}\rho_2 - s_{33}\rho_3 - s_{32}\rho_3 s_{23}\rho_2 + s_{22}\rho_2 s_{33}\rho_3) + s_{32}\rho_3 s_{13}(1 - s_{22}\rho_2)}{1 - s_{22}\rho_2 - s_{33}\rho_3 - s_{32}\rho_3 s_{23}\rho_2 + s_{22}\rho_2 s_{33}\rho_3} + \frac{s_{21}\rho_2 s_{12}(1 - s_{33}\rho_3) + s_{32}\rho_3 s_{23}\rho_2 s_{12} + s_{21}\rho_2 s_{32}\rho_3 s_{13}}{1 - s_{22}\rho_2 - s_{33}\rho_3 - s_{32}\rho_3 s_{23}\rho_2 + s_{22}\rho_2 s_{33}\rho_3} = 0.120 e^{j1.870} \quad (5.6)$$

Výchozí brána:	<input type="text" value="Trojbran: Brána 1"/>	Koncová brána:	<input type="text" value="Trojbran: Brána 1"/>
<input type="button" value="Počítej"/>		Výsledek:	<input type="text" value="0.12057*e&lt;sup&gt;j1.8706°&lt;/sup&gt;"/>

Obrázek 41: Příklad 12.6 spočítaný programem

## 5.7 Zhodnocení

Numerické hodnoty prvků byly vybrány tak, aby se vždy projevilo alespoň mírné impedanční nepřizpůsobení, které v orientovaném grafu vygeneruje smyčky, kterými se lépe otestuje správná funkce programu. Ve všech šesti testovaných příkladech se hodnota vypočtená pomocí vztahu ze skript a pomocí programu shodují.

## 6 Závěr

V programovacím prostředí Matlab byl implementován navržený algoritmus sestavující přenosovou funkci pomocí metody orientovaných grafů a Masonova pravidla. Dále bylo navrženo grafické rozhraní umožňující uživateli sestavit a analyzovat mikrovlnný obvod. Jednotlivé mikrovlnné prvky lze vybírat z databáze, nebo je lze přímo nadefinovat pomocí rozptylových matic. Po spojení příslušných bran lze získat numerickou hodnotu přenosové funkce mezi jakýmkoli dvěma branami analyzovaného obvodu.

Program byl testován na šesti příkladech ze skript [1]. Do obecných vztahů sestavených pomocí Masonova pravidla, byly dosazeny hodnoty, jež by mohly mít reálné prvky. Stejně hodnoty byly vloženy i do navrženého programu a poté byl porovnán výsledek. Ve všech šesti případech se výsledná hodnota přenosové funkce rovnala hodnotě předpokládané.

Program je dostupný ve dvou verzích. Buď jako textový soubor, který lze spustit přímo v Matlabu, prohlížet si a editovat jeho kód, nebo jako zkompilovaný spustitelný soubor (32 i 64 bitový), pro jehož běh není potřeba placené prostředí programu Matlab, ale pouze volně dostupné knihovny Matlab runtime, které jsou součástí instalačního balíčku. Může tak sloužit například studentům jako pomůcka při učení, či návrhu jednoduchých mikrovlnných obvodů.

# Seznam zdrojů a literatury

1. **OPPL, L.** *Úvod do mikrovlnné techniky- Sbíрка příkladů.* Praha : Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-03054-7.
2. **VRBA, J.** *Úvod do mikrovlnné techniky.* Praha : Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02112-2.
3. **NOVOTNÝ, K., a další.** *Vlny a vedení.* Praha : Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03317-1.
4. **HOFFMANN, K. a HUDEC, P.** *Vysokofrekvenční a mikrovlnná měření.* Praha : Česká technika - Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 978-80-01-03442-2.
5. **PUNČOCHÁŘ, J., MOHYLOVÁ, J. a ORSÁG, P.** *Řešení obvodů grafy signálových toků.* [Elektronická učebnice] Ostrava : MŠMT ČR, 2012.
6. **MASON, S. J.** *Feedback Theory - Further properties of signal flow graphs.* [Elektronická kopie dokumentu] Cambridge : Massachusetts institute of technology, 1955.
7. **Govind, Kaustubha.** MATLAB Central. *Deploy for windows 32-bit from a 64-bit computer.* [Online] 4. 4 2011. [Citace: 18. 5 2016.] <http://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/4649-deploy-for-windows-32-bit-from-a-64-bit-computer>.
8. **Wikipedia.** Samuel Jefferson Mason. [Online] 26. 4 2016. [Citace: 7. 5 2016.] [https://en.wikipedia.org/wiki/Samuel\\_Jefferson\\_Mason](https://en.wikipedia.org/wiki/Samuel_Jefferson_Mason).
9. **MathWorks.** MATLAB. *Matlab.* [Online] Mathworks, 28. 11 2015. [Citace: 7. 5 2016.] <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.
10. **ČAPEK, M.** *Přednášky k předmětu MATLAB (A0B17MTB).* [PDF] Praha : ČVUT, 2013.

# Seznam příloh

1. Digitální verze tohoto textu v PDF
2. Zdrojový kód programu
3. Instalační soubor programu
4. Uložené soubory obvodů analyzovaných v kapitole 5