

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Liberec 2009

Zdeněk Posselt

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: B2612 Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Informatika a logistika

Jednoduchý obvodový simulátor v jazyce JAVA™

JAVA™ simple circuit simulator

Bakalářská práce

Autor:	Zdeněk Posselt
Vedoucí práce:	Ing. Martin Černík, Ph.D.
Konzultant:	doc. Ing. Ivan Doležal, CSc.

V Liberci 29. 5. 2009

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé BP a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom(a) toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na obvodové simulátory. Její první částí je zmapování dnes dostupných obvodových simulátorů. V druhé části se zabývá vytvořením výukové pomůcky pro předmět Elektrické obvody, a to jednoduchého obvodového simulátoru v jazyce JAVA™. V tomto obvodovém simulátoru si student může sestavit jednoduchý obvod z prvků (rezistor, induktor, kapacitor a proudový zdroj). Obvodový simulátor poté vypočítává uzlová napětí.

Abstract

This bachelor work is sighted on circuit simulators. First part of this work is about circuit simulators which are now available. Second part is dealing with creating teaching aid for article Electric circuits. Objective is to create JAVA™ simple circuit simulator. In this simulator student can complete simple electric circuit from basic components (resistor, inductor, capacitor and power supply). Circuit simulator then computes current node voltages.

Klíčová slova:

obvodový simulátor, elektrický obvod

Key words:

circuit simulator, electric circuit

Obsah

1	Obvodové simulátory	8
1.1	Základní informace	8
1.1.1	Blokové schéma obvodového simulátoru:	8
1.2	Obvodová analýza	9
1.2.1	Vícenásobná analýza	9
1.2.2	Steady-state analýza (DC Analysis)	9
1.2.3	Frequency response analýza (AC Analysis)	11
1.2.4	Time-domain analýza (Transient Analysis)	12
1.2.5	Extending analyses	13
1.2.5.1	Transfer function	13
1.2.5.2	Sensitivity	14
1.2.5.3	Fourier Analysis	14
1.2.5.4	Noise	15
1.2.6	Simulation modes	15
1.3	Overview of circuit simulators	17
1.3.1	SPICE	17
1.3.2	SNAP	18
1.3.3	TINA-TI	19
1.3.4	Analog Circuit Simulator	19
1.3.5	PSpice (HSpice, XSpice)	20
1.3.6	Multisim (Electronic WorkBench)	21
1.3.7	Micro-Cap	21
1.3.8	QUCS	22
2	Simple circuit simulator in Java™	23
2.1	Input	23
2.2	GUI	23
2.3	JAVA™ applet	24
2.3.1	JAVA™	24
2.3.2	Used programs	24
2.3.3	Applet placement	24
2.4	Description of applet	25

2.4.1	Úvodní zobrazení	25
2.4.2	Ovládací prvky	25
2.4.3	Pole pro zadání obvodu	26
2.4.4	Diagnostika a informace	27
2.4.5	Hodnoty a výsledky	28
2.5	Popis zdrojového kódu	31
2.6	Výpočetní část	34
2.6.1	Převod prvků na hodnoty	34
2.6.2	Vyplnění admitanční matice	35
2.6.3	Vyplnění matice proudů	35
2.6.4	Způsob výpočtu	35
2.6.5	Výpočet inverzní matice	36
2.6.6	Výpočet výsledných uzlových napětí	36
3	Příklady	37
3.1	Příklad 1	37
3.1.1	Zadání	37
3.1.2	Výpočet	37
3.2	Příklad 2	40
3.2.1	Zadání	40
3.2.2	Výpočet	40
4	Závěr	44

Seznam symbolů, zkratk a termínů

DC – direct current – stejnosměrný elektrický proud

AC – alternating current – střídavý elektrický proud

GPL – General Public License – licence pro svobodný software

GUI – Graphical User Interface – grafické uživatelské rozhraní

netlist – textový soubor, seznam prvků, jednoznačně popisující elektrický obvod

1 Obvodové simulátory

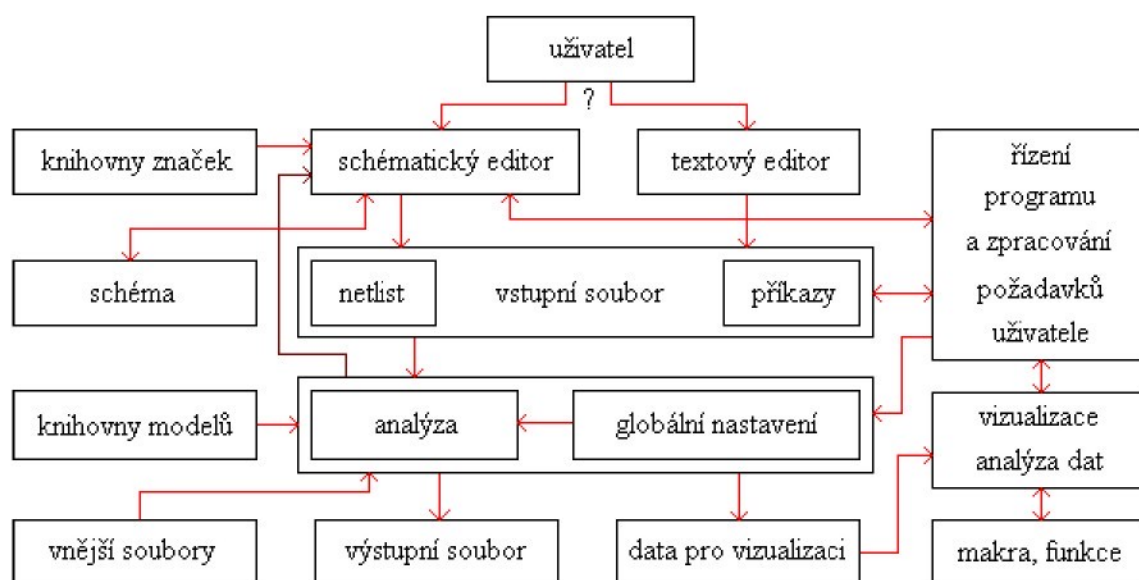
1.1 Základní informace

Při vývoji nového elektrického obvodu jsou dnes nezbytnou pomocí obvodové simulátory. Přímá konstrukce elektronického obvodu je při současné složitosti elektronických dělů značně neefektivní a nákladná.

Elektrický obvodový simulátor využívá matematických modelů k replikování chování elektrické součástky nebo obvodu. Využívá jednoduché filozofie, a to že prakticky jakýkoliv elektrický obvod lze modelovat na základě několika málo elementárních součástek. Těmito součástkami jsou pasivní prvky (R , L , C), polovodičové prvky (dioda, tranzistor), zdroj proudu a napětí, spínač řízený napětím, spínač řízený proudem a přenosové vedení. Další součástky nebo celé bloky lze získat skládáním z elementárních součástek.

Simulování chování obvodu, před sestavením z reálných součástek, velmi zvyšuje efektivitu a poskytuje pochopení chování elektronického obvodu při jeho sestavování. Obzvláště, pro integrované obvody, kde vybavení pro výrobu plošných desek je velmi nákladné, nepájené kontaktní pole jsou nepraktická, a zkoumání chování vnitřních signálů velmi obtížné. Dnes již téměř každý návrhář elektronických obvodů hodně spoléhá na obvodové simulátory. Nejznámějším analogovým obvodovým simulátorem je SPICE. Některé simulátory integrují schematický editor, simulační prostředky, zobrazení výstupů v grafické podobě a obsahují také rozsáhlé knihovny modelů a součástí.

1.1.1 Blokové schéma obvodového simulátoru:



1.2 Obvodová analýza

Základem většiny analýz je hledání stejnosměrných ustálených stavů analyzovaného obvodu. Používaný algoritmus řeší obecně velmi náročnou matematickou úlohu, hledání řešení soustavy nelineárních algebraických rovnic. Na tomto algoritmu závisí chod simulačního programu, výsledné hodnoty a nepřímo i spokojenost uživatele.

Před vlastním spuštěním simulace, obvodový simulátor nejdříve provede kontrolu zadaného obvodu. Zkontroluje zadané hodnoty, parametry součástek, jména konektorů atd.

Simulační program poté algoritmicky sestaví obvodové rovnice metodou uzlových napětí a pak počítá všechny neznámé, tj. uzlová napětí. Program sestaví tolik nelineárních rovnic, kolik je uzlových napětí. Iterační metoda tedy musí být zobecněná pro více proměnných. Nazývá se Newtonova-Raphsonova iterační metoda. V různých modifikacích je zabudována do všech stávajících simulačních programů do procedur pro hledání stejnosměrných pracovních bodů.

Použitá iterační metoda se může v určitých případech dostat do problémů s konvergencí. Nelineární obvod totiž může mít několik stejnosměrných pracovních bodů. Obecně mohou nastat tyto případy:

- Program najde správný pracovní bod.
- Program najde nesprávný pracovní bod.
- Program nenajde v daném počtu iterací žádný pracovní bod.

Předějit tomuto chování a ovlivnit výsledek můžeme volbou prvního odhadu řešení, tj. volbou souřadnic počáteční, nulté iterace. Pokud bude odhad blízký pracovnímu bodu, který nás zajímá, je naděje, že k němu program dospěje.

1.2.1 Vícenásobná analýza

Vícenásobná analýza slouží pro kvalitativní zpracování výsledků krokování parametru nebo analýzy Monte Carlo (popř. Worst Case). Princip spočívá v odvození jediné hodnoty z každého dílčího běhu a zobrazení těchto hodnot do grafu v závislosti na krokovaném parametru. Pro analýzu Monte Carlo se zobrazí histogram.

1.2.2 Stejnosměrná analýza (DC Analysis)

Hledání stejnosměrného řešení patří k nejdůležitějším operacím simulačního programu, protože probíhá v rámci všech základních analýz. Z matematického hlediska

se jedná o iterační řešení soustavy nelineárních rovnic. U některých obvodů nemusí vyjít výsledek podle našich představ, třeba není nalezeno žádné řešení z důvodu problému s konvergencí nebo je nalezeno řešení, o které nemáme zájem. Řešení těchto problémů nebývá jednoduché, je zapotřebí si „pohrát“ s nastavením programu, určením počátečních podmínek simulace a také vyvarovat se chyb při modelování. Zejména tzv. behaviorální modelování, kdy zjednodušeně popisujeme vnější chování složitějšího bloku bez vnitřních vazeb, může být zdrojem častých problémů a nestandardního chování simulačního programu.

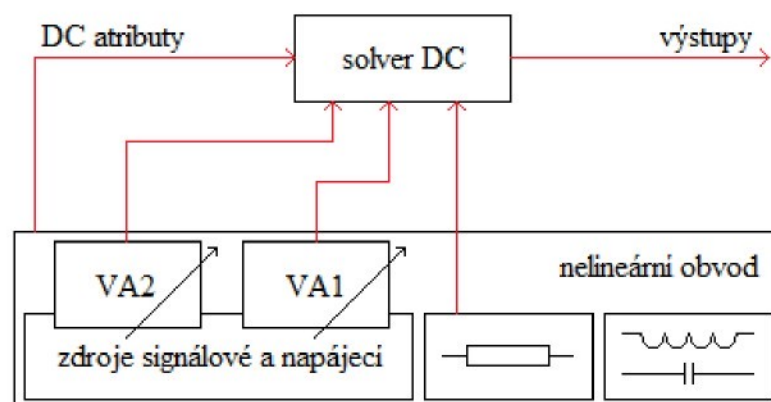
Stejnoseměrná analýza = analýza stejnosměrných poměrů v obvodu.

- Jednorázový výpočet stejnosměrného pracovního bodu.
- Analýza DC.
- Analýza „Dynamic DC“ – dynamická, interaktivní analýza.

Analýza DC

= napodobování funkce přístroje pro snímání stejnosměrných charakteristik nelineárních obvodů

Postup simulátoru při analýze DC:



Možnosti krokování:

klasická stejnosměrná analýza

- napětí a proudy nezávislých zdrojů v obvodu

zobecněná stejnosměrná analýza

- napětí a proudy nezávislých zdrojů v obvodu
- teplota
- libovolný parametr z modelů součástek v obvodu
- libovolná globální proměnná

Ostatní nezávislé zdroje jsou nahrazeny zdroji o parametrech DC, řízené zdroje pracují se stejnosměrnými vzorci a v modelech prvků se uplatňují pouze stejnosměrné parametry.

1.2.3 Kmitočtová analýza (AC Analysis)

Analýza AC znamená analýzu linearizovaného obvodu v harmonickém ustáleném stavu. Nejdříve je nalezen stejnosměrný pracovní bod obvodu, poté se provede linearizace obvodu v tomto pracovním bodu, a nakonec se nahradí nezávislé zdroje v obvodu jejich AC atributy. Vznikne tak model pro řešení analýzou AC. Pro provedení analýzy musí být zadán způsob rozmitání kmitočtu, tj. začátek, konec a krok. Tento kmitočet je v průběhu analýzy přiřazen současně všem zdrojům signálu. Tím je zaručeno, že pro konkrétní kmitočet je vždy řešen obvod v harmonickém ustáleném stavu. Řešení probíhá pomocí klasického fázorového počtu, takže každé napětí a proud je reprezentováno komplexním číslem, v jehož modulu a argumentu je informace o amplitudě a počáteční fázi na daném kmitočtu.

Kmitočtová analýza

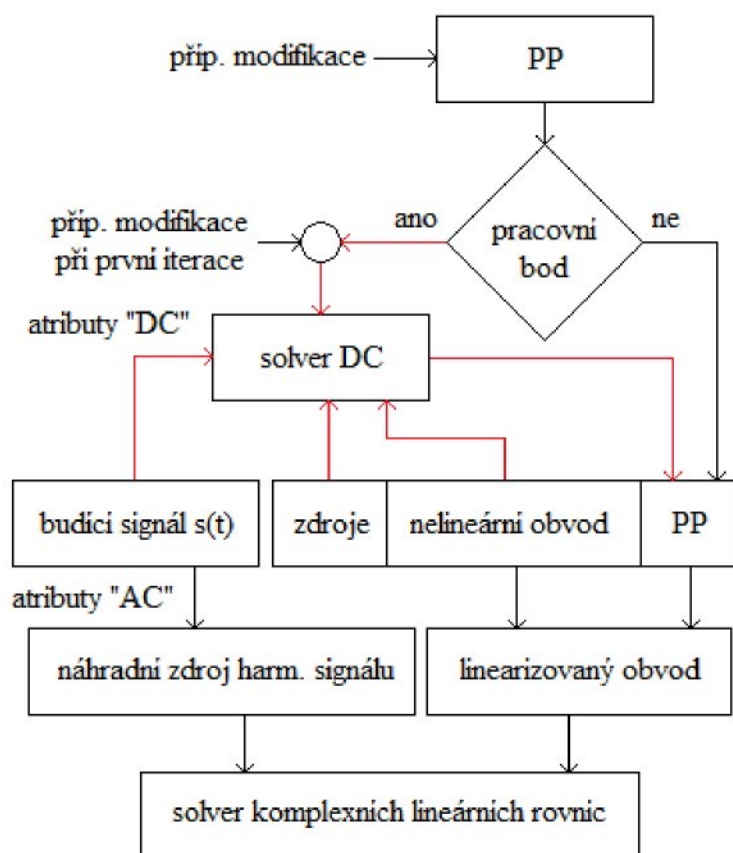
= analýza kmitočtových závislostí obvodových veličin v harmonickém ustáleném tvaru

- Napodobování činnosti „inteligentního obvodového analyzátoru“

Příbuzné analýzy:

- šumová analýza
- analýza nelineárního zkreslení
- analýza nulových bodů a pólů
- různé způsoby dalšího zpracování analyzovaných signálů

Postup simulátoru při kmitočtové analýze:



AC analýza = opakovaná analýza linearizovaného obvodu v harmonickém ustáleném tvaru pomocí fázorů pro řadu kmitočtů ze specifikovaného pásma.

1.2.4 Časová analýza (Transient Analysis)

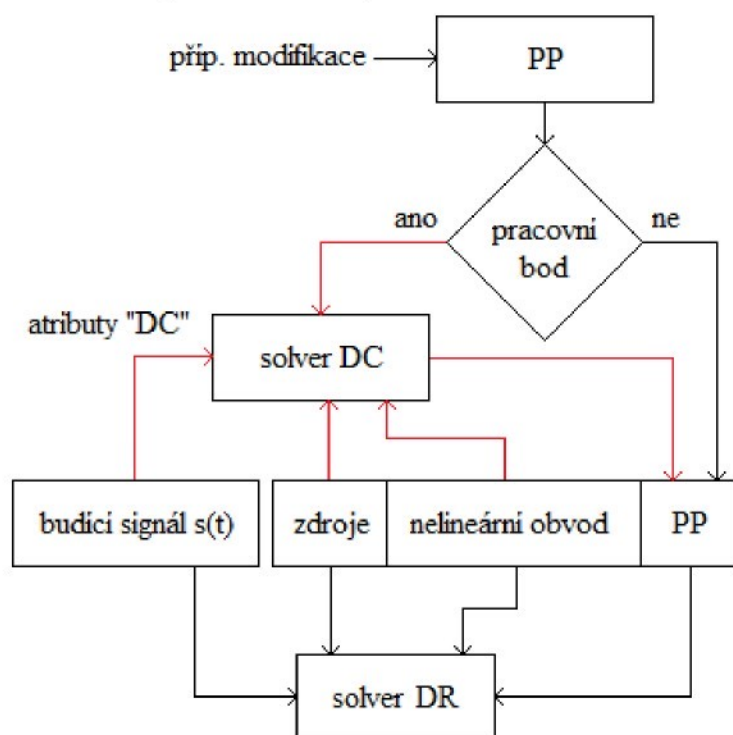
Pomocí časové analýzy můžeme zkoumat časové průběhy signálů na vstupech, výstupech a uvnitř obvodu. Při této analýze bychom měli respektovat skutečnost, že sledované časové průběhy závisí nejen na budících signálech, ale i na tom, v jakém stavu se obvod nacházel na začátku simulace, například zda kapacitory v obvodu byly vybity či nikoliv a zda induktory tekli počáteční proud. Tyto podmínky je možné nastavit nebo ponechat nenastavené, v tomto případě se použijí nulové hodnoty.

Časová analýza = analýza časových průběhů obvodových veličin.

- napodobování činnosti „inteligentního osciloskopu“
- různé způsoby dalšího zpracování analyzovaných signálů

Inteligentní osciloskop: časové průběhy napětí, proudu a všeho, co lze popsat vzorci, ve všech možných stavech obvodu (přechodové, ustálené, jednorázové děje).

Postup simulátoru při časové analýze:



Pro časovou analýzu se často využívají generátory různých signálů. K tomuto účelu se využívají zdroje napětí a proudu. Máme dvě možnosti jak definovat časový průběh. Buď průběh definujeme matematickým vzorcem, ve kterém figuruje proměnná času, nebo přímo definováním tvaru časového průběhu.

Základní časové průběhy jsou:

- impulzní průběh
- harmonický signál
- exponenciální průběh
- po částech lineární signál
- kmitočtově modulovaný signál

1.2.5 Rozšiřující analýzy

1.2.5.1 Přenosová funkce (Transfer function)

Rozšiřuje analýzu DC. Program nejprve linearizuje obvod v okolí stejnosměrného pracovního bodu a pak počítá malosignálové stejnosměrné obvodové funkce. Akumulační prvky jsou při této analýze ignorovány. Znamená to, že vlastně počítáme nízkofrekvenční linearizované parametry obvodu jako střídavá zesílení, střídavý vstupní odpor apod. v pásmu velmi nízkých kmitočtů.

Počítají se přenosové funkce:

- výstupní veličina / napětí nebo proud vstupního zdroje
- vstupní odpor
- výstupní odpor

Program provede velmi malou změnu DC hodnoty vstupního zdroje a vyhodnocuje vyvolanou změnu výstupní veličiny. Podíl změny výstupní a vstupní veličiny je přenosová funkce.

Vstupní odpor se zjišťuje tak, že se provede velmi malá změna DC na vstupu a vyhodnotí se vyvolaná změna na proudu resp. napětí zdroje. Vstupní odpor je poměrem obou hodnot.

Pro výpočet výstupního odporu je nejdříve mezi výstupní svorky zapojen pomocný zdroj. V druhé fázi je provedena velmi malá změna DC parametru zdroje a vyhodnocena změna proudu tímto zdrojem. Výstupní odpor je poté poměrem napěťové a proudové změny.

1.2.5.2 Citlivostní analýza (Sensitivity)

Rozšiřuje analýzu DC. Program nejdříve provede linearizaci v okolí stejnosměrného pracovního bodu a poté počítá citlivosti zadaných výstupních veličin na parametry součástek v obvodu. Akumulační prvky jsou při této analýze ignorovány.

Určuje se:

- citlivost absolutní (změna sledované veličiny / změna parametru)
- citlivost relativní v procentech ($0,01 \cdot \text{absolutní citlivost} / \text{klidová hodnota parametru v pracovním bodu}$)

Relativní citlivost nám udává, o kolik se změní sledovaná veličina oproti své klidové hodnotě, když se sledovaný parametr změní o 1 % oproti své klidové hodnotě.

Citlivost se počítá pro součástky, které mají vliv na stejnosměrné řešení.

1.2.5.3 Fourierova analýza (Fourier Analysis)

Rozšiřuje analýzu Transient. Slouží k výpočtu spekter signálů získaných v analýze Transient. K výpočtu spektrálních čar signálů se používá algoritmus DFT/FFT.

Zásady pro správné používání algoritmu DFT/FFT:

- vstupem je N vzorků signálu, navzorkování musí být rovnoměrné
- všechny vzorky musí spadat přesně do 1 opakovací periody signálu, v krajním případě do celistvého počtu opakovacích period

- spektrální čáry jsou vypočteny přesně, pokud je splněna podmínka vzorkovacího teorému (vzorkovací frekvence je více jak dvojnásobek maximálního kmitočtu analyzovaného signálu), jinak vzniká chyba.

1.2.5.4 Šumová analýza (Noise)

Rozšiřuje analýzu AC. Vychází z toho, že rezistory a polovodičové prvky jsou zdroji vlastního šumu. Tudíž šumová analýza = analýza pronikání těchto šumů na výstup obvodu. Výstupní šum je poté možno za pomoci vstupně-výstupního přenosu přepočítat na vstupní svorky obvodu. Porovnání úrovně šumu s úrovněmi užitečného signálu nám dává představu o odstupu signálu od šumu. Předmětem šumové analýzy jsou tedy pouze vnitřní zdroje šumu. Standardně je možno modelovat tři druhy šumu, tepelný šum rezistorů a blikavý a výstřelový šum v polovodičích.

Šum lze charakterizovat jako v čase náhodně se měnící signál. Nejčastěji popsán spektrální hustotou (napěťovou a proudovou). Blikavý šum se uplatňuje na nízkých kmitočtech (1 Hz až přibližně 1 kHz podle typu polovodičové součástky). V navazujícím kmitočtovém pásmu se uplatňují šum tepelný a výstřelový.

V rezistorech je tepelný šum způsoben náhodným pohybem elektronů v odporových strukturách.

V polovodičích je kmitočtově nezávislý výstřelový šum (též bílý šum), který vzniká protékáním stejnosměrného proudu přes polovodič, kdy náhodně vznikají a rekombinují páry elektron-díra. Blikavý šum vzniká v oblasti přechodu P-N, který je narušen nečistotami nebo poruchami struktury na povrchu polovodiče. Závisí na proudu polovodičem a je nepřímo úměrný kmitočtu.

1.2.6 Analyzační režimy

- **krokování (Stepping)**

Používá se při opakované analýze obvodu, kde zjišťujeme vliv určitého parametru (popř. parametrů) na určitý stav hodnoty v obvodu. Nastavuje se počáteční hodnota parametru, koncová hodnota parametru a požadovaný krok. Výsledkem bývá sít' charakteristik nebo numerické hodnoty.

- **teplotní analýza (Thermal Analysis)**

V modelech rezistorů, kapacitorů, induktorů a zejména polovodičových prvků figurují teplotní závislosti nejrůznějších parametrů. Obvykle se ve výpočetních vzorcích používají dvě teploty:

- teplota součástky (pracovní teplota součástky, která ovlivňuje její elektrické parametry)
- nominální teplota (teplota, při které byly měřeny parametry součástky uváděné v knihovně)

V základním režimu je teplota definována globálně, někdy však potřebujeme ošetřit situace, kdy různé součástky mají různé teploty, k tomu slouží složitější systém teplotní simulace.

- vyhodnocovací analýza (Performance analysis)

Tato analýza se plně provádí v modulu „vizualizace, analýza dat“. Na výsledky analýzy je možné pohlížet jako na značné množství numerických dat. K jejich zpracování nám slouží měřicí funkce. Tyto funkce slouží k hledání lokálních či globálních extrémů, dob náběhu impulzu, šířky impulzu, opakovacímu kmitočtu nebo periodě signálu a řadě dalších. Jsou zde zobrazovány grafy, zpracovávají se výsledky vícenásobných analýz, vzniklé krokováním parametrů.

- statistická analýza (Monte Carlo, Worst Case)

Hlavním důvodem statistické analýzy je potřeba zjistit, nakolik výrobní rozptyly parametrů jednotlivých součástek ovlivňují vlastnosti obvodu. Jinými slovy, jak může nedodržení jmenovitých hodnot jednotlivých parametrů odklonit výsledné charakteristiky obvodu od charakteristik požadovaných.

Statistickou analýzu lze uskutečnit nad analýzami AC, DC i Transient.

Prakticky provedení této analýzy znamená, že jsou vybrány parametry součástek, které budou vykazovat tolerance. Poté je provedena mnohonásobná analýza obvodu. Při každém průběhu analýzy jsou za hodnoty parametrů dosazena náhodná čísla, která závisí na jmenovitých hodnotách parametrů a na statistickém rozložení příslušných tolerancí. Vyhodnocení může být buď vizuální (sít charakteristik), nebo statistické (střední hodnota, rozptyl).

Při statistické analýze se používají dva způsoby rozmítání hodnot součástek:

- Monte Carlo (rozmítání podle různých statistických zákonitostí, třeba dle Gaussova rozložení)
- Worst Case (hodnoty jsou voleny náhodně, ale až na hranici tolerancí, některé simulační programy umožňují testovat všechny možné kombinace, což může být velmi časově náročné)

1.3 Přehled obvodových simulátorů

- nekomerční
 - SPICE
 - SNAP
 - TINA-TI
 - Analog Circuit Simulator
- komerční
 - PSpice (HSpice, XSpice)
 - MultiSim (Electronic WorkBench)
 - Micro-Cap
- QUCS

1.3.1 SPICE

Historie tohoto programu pro simulaci začíná už v šedesátých letech minulého století. Původní program byl převážně pro armádní využití. Až v roce 1973 došlo k představení programu SPICE1 veřejnosti. Program byl celý napsán v jazyce FORTRAN. V té době neměl grafické rozhraní, obsahoval jen málo prvků a měl určitá omezení. Větší popularitu získal v roce 1975 při uvedení SPICE2. Původní verze byla velmi vylepšena a rozšířena. Přinesla i bohatší knihovnu modelů. Poslední verze psaná jazykem FORTRAN byla 2.6 v roce 1983. Další verze, již programovaná v jazyce C, byla SPICE3. Stále je používána stejná syntaxe netlistu. Tato verze jako první přidává grafickou podporu pro vykreslování grafů apod. SPICE byl vytvářen jako open source program a tak se stal velmi využívaným a rozšířeným.

Popularita programu SPICE vycházela z velkých možností analýzy a modelů potřebných pro vytváření modelů integrovaných obvodů. Navíc byla dostatečně robustní a rychlá k praktickému využití.

Dostupné analýzy:

- DC analýza
- AC analýza nízko-úrovňových signálů
- časová analýza
- analýza nuly-póly
- analýza zkreslení signálu s nízkou amplitudou
- analýza citlivosti

- šumová analýza
- rozšiřující analýzu teplotní závislosti

Webové stránky programu: bwrc.eecs.berkeley.edu/Classes/icbook/SPICE

1.3.2 SNAP

SNAP (Symbolic Network Analysis Program) volně šiřitelný program pro symbolickou, semisymbolickou a numerickou analýzu elektronických obvodů. Tento program jako ostatní numerické simulační programy poskytuje numerické výsledky, většinou ve formě grafů, ale navíc generuje i podstatné mezivýsledky, tj. analytické vzorce. Z vzorců jsou pak patrné důležité souvislosti mezi obvodem a jeho chováním. Umožňuje neomezené rozšiřování knihovny součástek o vlastní obvody.

K dispozici jsou obvodové funkce:

- přenos napětí, přenos proudu
- vstupní impedance při výstupu naprázdno
- vstupní impedance při výstupu nakrátko
- výstupní impedance při vstupu naprázdno
- výstupní impedance při vstupu nakrátko
- transimpedance
- transkonduktance
- dvojbrankové parametry (a, b, z, y, h, k)
- determinanty všech dvojbrankových matic
- vstupní a výstupní vlnové (obrazové) impedance.

Dále je možné provádět citlivostní analýzu všech obvodových funkcí na parametr libovolné součástky.

Formy výstupů:

- symbolická forma: vzorec, složený ze symbolů parametrů součástek obvodu
- semisymbolická forma: namísto symbolů jsou číselné hodnoty, jediným symbolem ve vzorci je komplexní kmitočet $s = j\omega$
- numerická forma: nulové body a póly, vzorce pro přechodovou a impulsní charakteristiku, výpočty a grafy

Program umožňuje export výsledků do MATLABu®, MATHCADu®, MAPLE® a do běžných aplikací Windows®.

Pro potřebu výuky je vytvořeno velké množství elektronických příkladů ze základů elektrotechniky a elektroniky, zesilovačů, oscilátorů, syntetických prvků a vysokofrekvenční techniky.

Webové stránky programu: snap.webpark.cz/index.html

1.3.3 TINA-TI

Lehce použitelný obvodový simulační program založený na SPICE. Obsahuje velmi obsáhlou knihovnu prvků jak pasivních tak aktivních, převážně se specializuje na obvody firmy Texas Instruments. K přímému použití je připraveno i mnoho makro-modelů. Ideální pro vytváření, testování a odlaďování jak základních tak složitých obvodů. Neobsahuje žádná omezení na druh ani počet použitelných prvků. Vzhledem k tomu, že se jedná o starší program tak jsou jeho hardwarové nároky velmi nízké.

Webové stránky programu: www.designsoftware.com

1.3.4 Analog Circuit Simulator

Jednoduchý simulátor elektronických obvodů. Jedná se o applet v jazyce JAVA™. Svojí jednoduchostí a intuitivním ovládáním je určen pro jednoduché a snadno pochopitelné demonstrování základních obvodů a principů. Simulátor obsahuje pouze modely ideálních součástek. Obsahuje sadu ukázkových běžně používaných obvodů. Nebo možnost vytvořit si svůj vlastní obvod, kdy si pravým tlačítkem myši vybíráme z menu součástku, kterou pak levým tlačítkem umístíme do obvodu. Pro lepší názornost simulátor používá animování průběhů, směru toku proudu v obvodu a třeba také barevné rozlišení aktuální velikosti napětí.

Ukázkové obvody obsahují:

- základní, sériové, paralelní
- AC obvody
- pasivní filtry
- pasivní obvody, transformátory
- diody, zenerovy diody, napěťové násobiče
- operační zesilovače, zesilovače, oscilátory
- MOSFETy, logické
- tranzistory,
- kombinační obvody
- sekvenční obvody, klopné obvody, čítače

- obvody s čipem 555
- přenosové linky
- memristory

Webové stránky programu: www.falstad.com/circuit

1.3.5 PSpice (HSpice, XSpice)

PSpice je obvodový simulátor založený na SPICE. Poprvé byl vydán už v roce 1984, tehdy stačily pouhé dvě 360kB diskety pro celý software. Dnes PSpice splňuje velmi komplexní průmyslové požadavky. Je jakýmsi standardem mezi simulátory založenými na SPICE. Je schopen simulovat komplexní návrhy obsahující analogové i digitální části. Díky dobré integraci může být simulace spuštěna přímo ze schématu. Elektrické chování obvodu tak může být rychle a jednoduše simulováno. Ušetří se tím doba potřebná ke stavbě prototypů. Důležité signály mohou být změřeny nebo znázorněny podobně jako na osciloskopu. PSpice je tvořen několika samostatnými programy, které tvoří kompaktní celek. Od verze 9 je program dodáván s novým editorem Capture vyvinutým firmou Orcad. Editor schématu umožňuje vytvořit jak samostatně použitelné schéma, tak zejména připravit popis obvodu jazyka SPICE, tak zvaný netlist, pro následnou analýzu.

Základní balík obsahuje:

- PSpice – modul pro simulaci smíšených obvodů
- Model Editor – program pro vytváření modelů součástek z naměřených nebo katalogových údajů
- Stimulus Editor – program pro grafické vytváření analogových a číslicových zdrojů s komplikovaným časovým průběhem
- Optimizer – modul pro optimalizaci obvodů
- Advanced Analysis – modul nové generace pro provádění citlivostní, toleranční a zátěžové analýzy a optimalizace

K dispozici je i volně stažitelná demo-verze, která je však omezena velikostí a komplexností obvodu.

HSpice a XSpice jsou programy podobné PSpice pouze od jiných tvůrců, liší se jen v některých ohledech.

Webové stránky programu:

www.cadence.com/products/orcad/pspice_simulation/pages/default.aspx

1.3.6 Multisim (Electronic WorkBench)

Multisim je nástupce programu Electronic WorkBench (EWB). Volně ke stažení je pouze omezená verze. Omezení je na 30 dní, 50 součástek, 750 vývodů a 2 vrstvy. EWB je dnes již poměrně zastaralý a má problémy s novějšími verzemi Windows®. Multisim je komerční nadstavbou SPICE. Díky své poměrně vysoké ceně za základní (Basic) verzi, je pro výukové použití spíše nevhodný. V komerčním využití uživatelé ocení, kromě intuitivního prostředí, velmi rozsáhlou databázi komponent (více jak 16000), modely komponentů od předních výrobců součástek a také průvodce pro automatické generování často používaných obvodů.

Pro potřeby výuky je k dispozici i 3D editor a simulátor, kde si může student na virtuálním napájení poli sestavit obvod, provádět simulace a měření.

Podporuje analýzy SPICE a navíc přidává některé další funkcionality, například možnost návrhu plošného spoje i s 3D zobrazením.

Webové stránky programu: www.ni.com/multisim

1.3.7 Micro-Cap

Micro-Cap, dnes již ve verzi 9, je integrovaný obvodový editor a analogově-digitální simulátor. Od prvního vydání v roce 1982, je Micro-Cap neustále rozšiřován a vylepšován. Grafické rozhraní je velmi intuitivní a jednoduché pro naučení.

Základní vlastnosti:

- integrovaný editor a simulátor
- interaktivní editování a simulace
- analýza přechodových jevů
- AC/DC analýza
- analýza přenosových funkcí
- citlivostní analýza
- analýza zkreslení
- analýza Monte Carlo
- knihovna více jak 20000 modelů
- vykreslování grafů, i během simulace
- podpora standardních SPICE modelů

K dispozici je volně stažitelná demoverze, která je omezena na 50 součástek ve schématu, omezenou knihovnou komponent, není zde program pro vytváření modelů a

některé další vlastnosti (funkce) nejsou přístupné. Kompletní verze tohoto software je určena díky své vysoké ceně nejspíše jen profesionálům.

Webové stránky programu: www.spectrum-soft.com/index.shtm

1.3.8 QUCS

QUCS (Quite Universal Circuit Simulator) je obvodový simulátor, jak sami autoři píší, stále nedokončen ale na cestě. Přesto se jedná o velmi kvalitní simulační program, který je stále inovován a doplňován o další prvky a funkcionalitu. Obsahuje grafické uživatelské rozhraní, které umožňuje zadání elektrického schéma, provedení analýzy a výpočtů a následné zobrazení výsledků.

Podporovanými typy simulací jsou:

- DC simulace
- AC simulace
- simulace přechodových dějů
- S-parametr simulace (druh nízko-úrovňové střídavé simulace. Nejčastěji se používá pro charakterizaci pasivních RF komponent a stanovení nízko-úrovňových charakteristik obvodu při specifickém zkreslení a teplotě.)
- digitální simulace

V simulaci jsou dostupné diskrétní komponenty, zdroje, sondy, přenosová vedení, nelineární komponenty, digitální a datové komponenty.

QUCS je vydáván pod GPL licenci a je tudíž volně dostupný pro uživatele a programátory.

Webové stránky programu: qucs.sourceforge.net

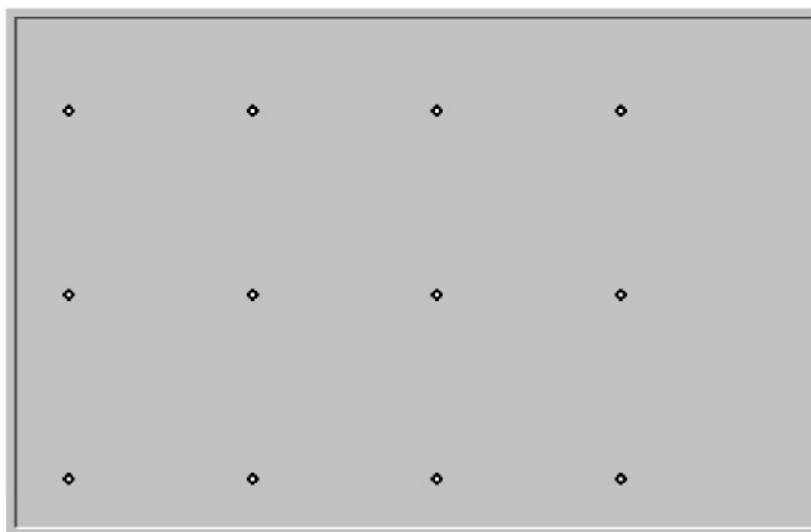
2 Jednoduchý obvodový simulátor v Javě™

2.1 Zadání

- Navrhnout GUI pro vložení jednoduchého elektrického obvodu do simulátoru.
- Navrhnout vhodný řešící algoritmus včetně jednoduchého výstupu pro vyřešené veličiny.
- Ověřit funkčnost na několika příkladech.

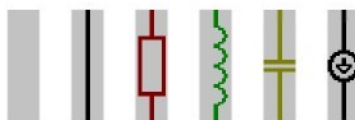
2.2 GUI

Pro potřeby vložení jednoduchého elektrického obvodu byla navržnuta pravoúhlá síť sestavená ze sítě 4 x 3 uzlů (Obr. 2.1).



Obr. 2.1 – Síť uzlů

Mezi tyto uzly je možné vkládat jednotlivé prvky. Těmito prvky jsou prázdný prvek, propojka, rezistor, induktor, kapacitor a proudový zdroj (Obr 2.2).



Obr. 2.2 – Prvky

Tato síť spolu s dalšími ovládacími prvky je zakomponována do JAVA™ appletu.

2.3 JAVA™ applet

2.3.1 JAVA™

Java™ je programovací jazyk pocházející od firmy Sun Microsystems. Jedná se o objektově orientovaný jazyk vycházející z C++, ke kterému má syntakticky nejblíže. Oproti svému předchůdci Java™ neobsahuje některé konstrukce, které způsobovaly při programování největší potíže, a navíc přidává mnoho užitečných vlastností. Velkou výhodou Javy™ je také její hardwarová nezávislost, neboť je překládána do speciálního mezikódu (bytecode), který je na konkrétním počítači nebo zařízení (PC, handheld, mobilní telefon, apod.) interpretován, případně za běhu překládán do nativního kódu. Programátor tedy může napsat program v Javě™ například na PC pod Windows a spustit jej na PC s Linuxem, na Macintoshi, SGI, DEC – zkrátka všude, kde je k dispozici Java runtime.

2.3.2 Použité programy

Applet je napsán v programovacím jazyce Java™, za použití JKD (Java Development Kit) ve verzi 1.6.0 update 12. Pro psaní appletu byla použita volně dostupná aplikace NotePad2 (jedná se o textový editor se zvýrazněním syntaxe, www.notepad2.com). Pro kreslení obrázků byla použita aplikace Malování, která je součástí operačního systému Microsoft® Windows®. Finální převod obrázků do formátu GIF byl uskutečněn za pomoci aplikace Adobe® Photoshop®.

2.3.3 Umístění appletu

Applet může být součástí jakékoliv webové stránky, do které se vkládá následujícím kódem:

```
<applet code="bp.class" width=1000 height=500></applet>
```

`code` – jméno zkompilované třídy appletu

`width` – šířka okna pro applet (neměnná)

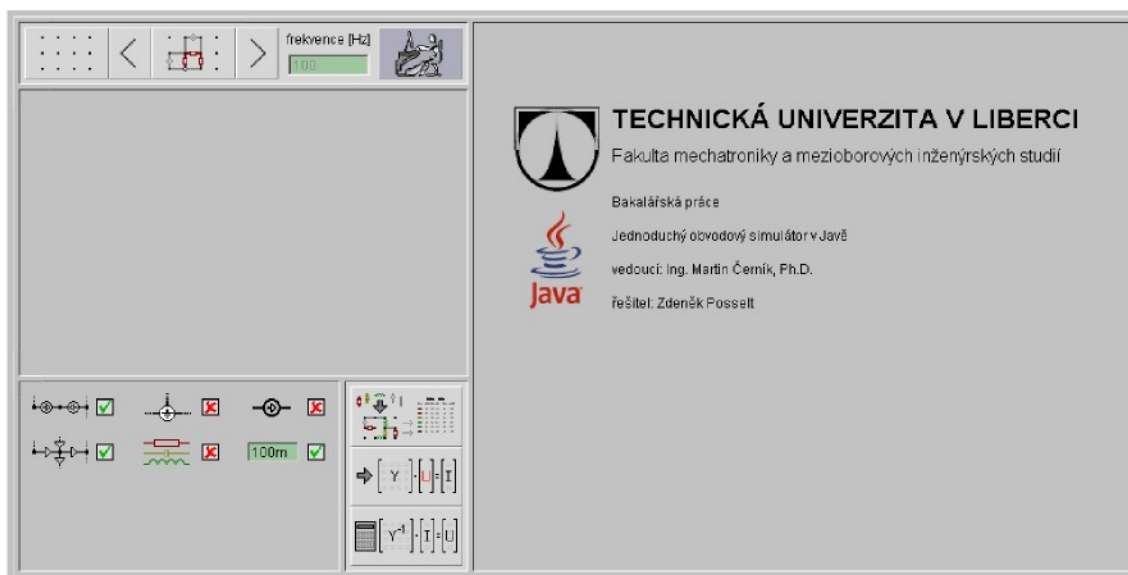
`height` – výška okna pro applet (neměnná)

Pro spuštění appletu je nutné mít v systému nainstalováno JRE – Java™ Runtime Environment. Při otevření stránky, pokud není JRE nainstalován, webový prohlížeč sám instalaci nabídne. Nebo je toto prostředí pro spouštění appletů dostupné ke stažení na stránkách www.java.com.

2.4 Popis appletu

2.4.1 Úvodní zobrazení

Po spuštění appletu jsou v pravé části zobrazeny základní informace (Obr. 2.3).



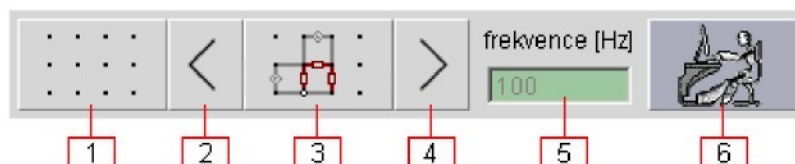
Obr. 2.3 – Úvodní zobrazení

Plocha appletu je rozdělena na několik částí:

- ovládací prvky
- matice uzlů pro zadání obvodu
- diagnostika obvodu a informace
- hodnoty a výsledky

2.4.2 Ovládací prvky

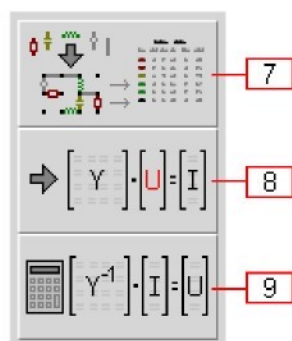
Ovládací prvky jsou rozděleny do dvou skupin, první skupina jsou tlačítka pro volby zadávání obvodu a tlačítka zobrazení informací o appletu (Obr. 2.4), druhá pro volbu zobrazení hodnot a výsledků (Obr. 2.5).



Obr. 2.4 – Ovládací prvky 1

- 1 – vymazání zadávacího pole prvků
- 2 – volba vzoru
- 3 – převzetí vzoru do zadávacího pole

- 4 – volba vzoru
- 5 – pole pro zadání frekvence
- 6 – zobrazení informací o appletu



Obr. 2.5 – Ovládací prvky 2

- 7 – volba režimu editace obvodu a zobrazení seznamu prvků
- 8 – zobrazení admitanční matice
- 9 – zobrazení invertované matice a výsledků

Pole pro zadání frekvence (Obr. 2.4 – 5) je omezeno minimální a maximální možnou zadatelnou hodnotou. Minimum je 1Hz a maximum 1000000Hz. Toto pole dovoluje zadávat pouze číslíce. Pokud je zadaná hodnota správně má zadávací pole pozadí v zelené barvě (Obr. 2.6 – 1), pokud je zadaná hodnota nesprávná tak v barvě červené (Obr. 2.6 – 2).

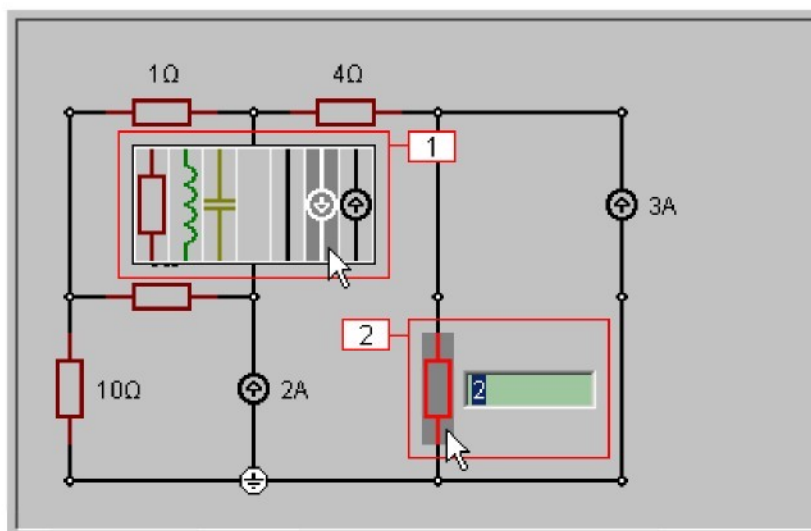


Obr. 2.6 – Zadávací pole frekvence

2.4.3 Pole pro zadání obvodu

Síť 4 x 3 uzlů umožňuje vložit jednoduchý obvod. Volba prvku se provádí najetím kurzoru myši na požadované místo, kde se stiskem levého tlačítka otevře menu volby prvku (Obr. 2.7 – 1). Pokud je navolen nějaký prvek (rezistor, induktor, kapacitor nebo proudový zdroj) tak se při najetí myši na tento prvek zobrazí zadávací políčko pro zadání hodnoty prvku (Obr. 2.7 – 2). Zadávání hodnoty je nutné zadat ve tvaru číslo nebo číslo a předpona. Číselná hodnota se může skládat jen z číslic a desetinné tečky. Předpona musí být ihned za číselnou hodnotou. Předpona může být **k** (kilo, 10^3),

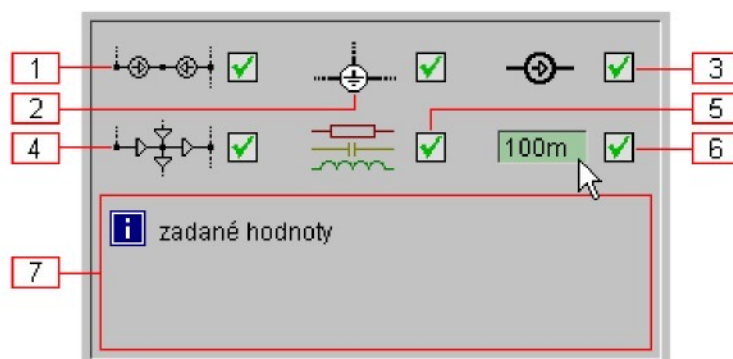
M (mega, 10^6), **G** (giga, 10^9), **T** (tera, 10^{12}), **P** (peta, 10^{15}), **E** (exa, 10^{18}), **m** (mili, 10^{-3}), **u** (μ , mikro, 10^{-6}), **n** (nano, 10^{-9}), **p** (piko, 10^{-12}), **f** (femto, 10^{-15}), **a** (atto, 10^{-18}).



Obr. 2.7 – Editace obvodu

2.4.4 Diagnostika a informace

V této části se zobrazuje diagnostika vloženého obvodu. Informuje o stavu, o chybách v zadání obvodu (Obr. 2.8).



Obr. 2.8 – Diagnostika a informace

1 – detekce sériově zapojených proudových zdrojů



- v obvodu jsou některé zdroje proudu zapojeny v sérii



- v obvodu není sériové zapojení zdrojů proudu

2 – určení nulového uzlu obvodu



- nulový uzel obvodu není určen



- nulový uzel obvodu určen

3 – existence proudových zdrojů v obvodu

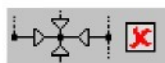


- v obvodu není žádný proudový zdroj



- v obvodu je minimálně jeden proudový zdroj

4 – detekce součtu známých proudů uzlu

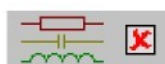


- v obvodu se nachází uzel, u kterého jsou známy vstupující a vystupující proudy, ale jejich součet není roven nule.

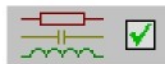


- v obvodu není žádný uzel se známými proudy, jejichž součet by nebyl roven nule.

5 – existence impedancí



- v obvodu se nenachází žádná impedance

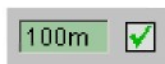


- v obvodu se nachází minimálně jedna impedance

6 – stav hodnot zadávacích polí



- v některém zadávacím poli je nesprávná hodnota



- hodnoty všech zadávacích polí jsou v pořádku

7 – prostor pro zobrazování pomocných informací a popisů, v případě zobrazování výsledných hodnot uzlových napětí.

Aby bylo možné provést výpočet obvodu, musí být všech těchto šest podmínek splněno.

2.4.5 Hodnoty a výsledky

Oblast, kde se, v závislosti na volbě tlačítka, zobrazují informace o obvodu, seznam prvků obvodu, admitanční matice a invertovaná matice s výslednými hodnotami uzlových napětí. Tyto zobrazení umožňují zvýraznit některé souvislosti a vazby. V případě zobrazení seznamu se zvýrazňuje prvek, na kterém je nastaven kurzor myši (Obr. 2.9). Zvýrazněny jsou i čísla uzlů, při nastavení kurzoru myši na uzel (Obr. 2.10).

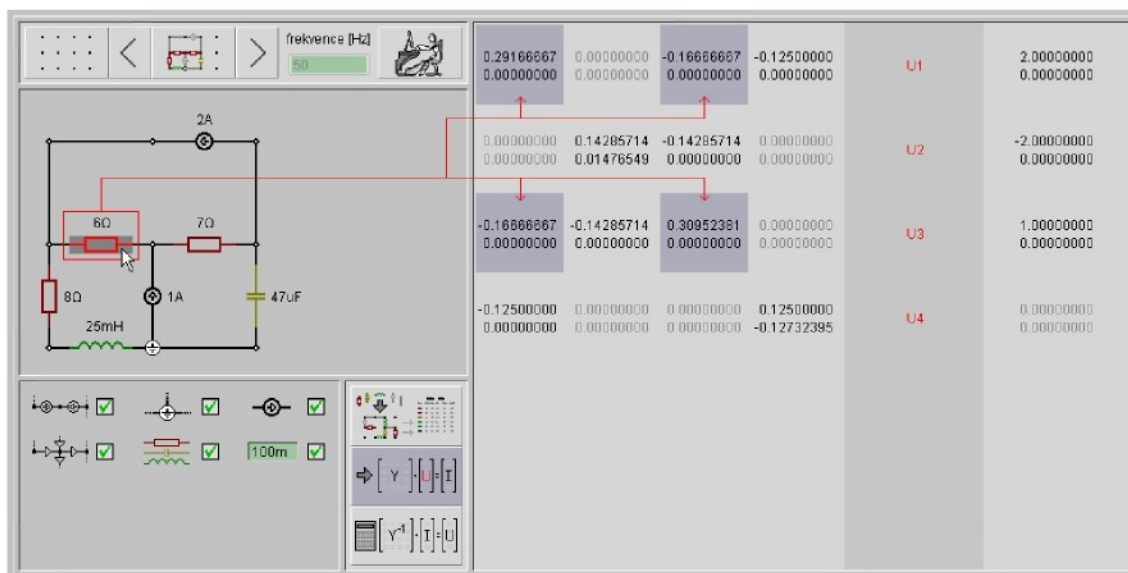


Obr. 2.9 – Zvýraznění prvku



Obr. 2.10 – Zvýraznění uzlu

V případě zobrazení admitanční matice, se při najetí myši na prvek zvýrazní pole matice, do kterých se tento prvek započítává (Obr. 2.11). Pokud najedeme myši na některý z uzlů tak je zvýrazněn uzel, řádek a sloupec tohoto uzlu (Obr. 2.12).



Obr. 2.11 – Zvýraznění v admitanční matici



Obr. 2.12 – Zvýraznění uzlu

Pokud je zobrazena inverzní matice a hodnoty výsledný uzlových napětí, tak se při nastavení kurzoru na určitý vrchol zvýrazní proudy a admitance, ze kterých je výsledné uzlové napětí spočítáno a také v informační části je vypsáno výsledné napětí i v absolutní hodnotě a úhel ϕ (Obr. 2.13).



Obr. 2.13 – Zvýraznění a zobrazení výsledných hodnot

2.5 Popis zdrojového kódu

Zdrojový kód by se dal rozdělit do několika základních částí. Na část inicializační, řídicí, vykreslovací a výpočetní. V inicializační části se vytvářejí proměnné, datová pole a konstanty. Řídicí část se stará o obsluhu kurzoru myši a o vstup dat z klávesnice. Vykreslovací část řídí vykreslování hodnot a grafiky v návaznosti na řídicí část. Výpočetní část je zodpovědná za výpočty a přípravu dat pro část vykreslovací. Celý applet čítá 1428 řádků kódu. Kompletní výpis appletu je připojen v kapitole č. 4. Následuje popis vlastního kódu appletu (od čísla řádku – do čísla řádku – popis):

1 – 11 – informace o appletu

12 – 16 – importování (připojování) používaných tříd

17 – 18 – třída komplexní číslo (**KC**), skládající se z dvou reálných proměnných (**double**) **r** a **i**, **r** = reálná, **i** = imaginární část komplexního čísla

19 – 24 – třída prvek, obsahuje hodnoty prvku, komplexní čísla (třídy **KC**) hodnot impedance (**Z**), proudu (**I**), napětí (**U**), napětí uzlu 1 (**U1**) a uzlu 2 (**U2**), dále číslo impedance (**Zc**), proudu (**Ic**), uzlu 1 (**U1c**) a 2 (**U2c**), číslo napětí uzlu (**Uc**), směr proudu (**Is**, -1 = zprava do leva a ze spodu nahoru, 0 = neznámý směr proudu, 1 = zleva doprava a ze shora dolů) a číslo prvku (**p**). Obsahuje také informaci o platnosti (validitě) hodnot impedance (**Zv**), proudu (**Iv**), napětí (**Uv**), napětí uzlu 1 (**U1v**) a uzlu 2 (**U2v**).

25 – 26 – definice hlavní třídy (**bp.class**)

27 – 96 – definování proměnných a nastavení jejich počátečních hodnot. Konstanty „falešné“ nuly (**nula**) a nekonečna (**neko**), tyto hodnoty jsou využívány pro ochranu výpočtů proti matematickým chybám typu dělení nulou apod. Řetězce znaků pro kontrolu zadávaných hodnot a pro výpisy jednotek. Pole pro uchování hodnot ze zadávacích polí (**hpop** = hodnoty, **jpop** = předpony). Pole pro převod čísel uzlů pro zobrazení (**zobrUc**). Pole pro uchování stavu zadávacích polí obvodu (**vpop**). Pole hodnot prvků a dočasných hodnot prvků (**d**, **t**). Matice komplexních čísel (**M**) a matice komplexních čísel pro invertovanou matici (**MI**). Pole pomocných hodnot pro vykreslování prvků do obvodu (**prvky**) a jeho naplnění hodnotami. Pole pro vzory obvodů, čísla prvků (**vzorP**) a jejich hodnoty (**vzorS**). Pole obrázků pro vykreslování prvků (**prv**), tlačítek (**tlc**), ostatních obrázků (**ost**) a diagnostiky (**dia**). Pole textových editačních políček (**pop**). Pole pro zadávání frekvence (**TFFreq**).

97 – 166 – inicializační metoda. Zde je alokována paměť pro hodnoty prvků a matic. Nastavení zadávacího pole frekvence. Načítání obrázků do polí. Vytváří se tu pole editačních polí pro vkládání hodnot prvků v obvodu.

167 – 169 – předefinování (přetížení) metody **update**, která je zodpovědná za překreslení plochy appletu na obrazovku. Tato metoda standardně nejdříve plochu vymaže a poté zavolá metodu pro překreslení (**paint**), čímž ale dochází k nepříjemnému blikání plochy appletu. Proto je předefinována, aby zavolala překreslovací metodu bez vymazání plochy appletu, čímž se toto blikání odstraní.

170 – 564 – metoda překreslení plochy appletu. Pro překreslování je použit objekt obrazu, do kterého probíhá vykreslování jednotlivých obrázků, textů a dalších komponent. Tento obrázek je po kompletním vykreslení přenesen na obrazovku.

172 – 189 – vymazání plochy a vykreslení základních rámečků.

190 – 198 – vykreslení tlačítek v závislosti na stavu řídicích proměnných

199 – 224 – vypsání hodnot prvků v editačním poli obvodu

225 – 236 – vykreslení prvků obvodu a propojek mezi prvkem a uzlem

237 – 247 – pokud je aktivní volba prvku, je vykresleno menu této volby

248 – 262 – vykreslení uzlů, v editaci všech, jinak jen použitých

263 – 382 – vykreslení seznamu prvků v pravé části plochy appletu

383 – 504 – vykreslení admitanční matice nebo invertované matice

505 – 522 – vykreslení informací o appletu

523 – 530 – vykreslení diagnostiky obvodu

531 – 560 – vykreslení informací, převážně závislých na pozici kurzoru myši
561 – 564 – přenesení pomocného obrazu na obrazovku (plochu appletu)
565 – 584 – metoda pro nulování určitého prvku. V závislosti na předaných parametrech umožňuje mazat určitý prvek, všechny prvky a to v oblasti dat **i**/nebo v oblasti dočasných dat.

585 – 601 – metoda pro překopírování hodnot z dat (**d**) do pomocných dat (**t**)
602 – 618 – metoda pro překopírování hodnot z pomocných dat (**t**) do dat (**d**)
619 – 635 – metoda pro určení čísel vrcholů a detekci propojek
636 – 732 – metoda pro odstranění prvků, které se v obvodu neprojeví, například prvku, který je připojen jen z jedné strany (netvoří smyčku).

733 – 765 – převod hodnot prvků ze zadávacího pole (hodnoty uchovány v polích **hpop** a **jpop**) do hodnot pole dat (**d**). Převod se provádí v závislosti na navoleném prvku (rezistor, induktor, kapacitor a proudový zdroj).

766 – 798 – rozšíření směru proudů. Toto je pomocná metoda pro detekci chybného zadání obvodu.

799 – 893 – metoda zjednodušující obvod. Toto je také pomocná metoda pro detekci chybného zadání obvodu. Provádí zjednodušení obvodu tak, že vyhledává sériové a paralelní kombinace prvků a přepočítává je na jednoduché impedance. Tím se obvod zjednoduší a umožní diagnostikovat sériové zdroje a chyby v součtu proudů uzlu.

894 – 983 – metoda pro doplňování neznámých proudů. Pomocná metoda pro detekci součtu proudů do uzlu.

984 – 1052 – obsluha pohybu kurzoru myši. Obsluha tlačítek, volby prvku a nastavování proměnných pro zvýrazňování souvislostí.

1053 – 1105 – obsluha tlačítka myši. V závislosti na proměnných nastavených v metodě na obsluhu pohybu myši, tato metoda obsluhuje reakce na stisk tlačítek appletu. Také obsluhuje volbu prvku při editaci obvodu.

1106 – 1133 – metoda, která při změně zadání přepočítá vložené hodnoty, provede detekci chyb v zapojení a pokud je splněno všech šest podmínek tak převede hodnoty z dat (**d**) do admitanční matice (**M**).

1134 – 1163 – vyplnění admitanční matice (**M**).

1164 – 1212 – metoda pro výpočet inverzní matice. Nejdříve je v paměti vytvořena matice o počtu řádků dle zjištěného počtu počítaných uzlů, ale o dvounásobném počtu sloupců (**PM**). Poté je do levé poloviny přenesena admitanční

matice (**M**). Pravá polovina je vyplněna jednotkovou maticí. Pomocí Gaussovy eliminační metody je jednotková matice převedena na levou stranu, tím na pravé straně vznikne matice inverzní. Tato matice je poté překopírována do inverzní matice (**MI**).

1213 – 1227 – výpočet výsledných uzlových napětí násobením sloupcové matice proudů a řádku inverzní matice.

1228 – 1268 – metoda pro kontrolu zadaného obvodu. Kontroluje stav pole pro zadání frekvence, je-li v obvodu určen nulový bod, nachází-li se v obvodu alespoň jeden proudový zdroj a alespoň jedna impedance, nejsou-li v obvodu nějaké proudové zdroje v sériovém zapojení, je-li součet všech proudů v případě uzlu, kde jsou všechny známy, roven nule a jsou-li všechna zadávací pole správně vyplněny.

1269 – 1323 – metoda reagující na změnu v editačních polích. Při změně hodnoty nějakého pole tato metoda kontroluje správnost (použitelnost) zadané hodnoty.

1324 – 1331 – metoda pro sečtení dvou komplexních čísel

1332 – 1339 – metoda pro odečtení dvou komplexních čísel

1340 – 1347 – metoda pro násobení dvou komplexních čísel

1348 – 1357 – metoda pro dělení dvou komplexních čísel. Tato metoda používá „falešnou“ nulu pro předejetí chybě dělení nulou.

1358 – 1364 – metoda pro výpočet absolutní hodnoty komplexního čísla

1365 – 1374 – vykreslení stínovaného rámečku

1375 – 1409 – metoda pro převod číselné hodnoty na textový řetězec s určitou délkou. Tato metoda se používá při vypisování číselných hodnot.

1410 – 1420 – metoda pro převod hodnoty i s předponou na textový řetězec. Tato metoda se používá při vypisování hodnot prvků v obvodu.

1421 – 1428 – definice nepoužitých metod pro obsluhu myši.

2.6 Výpočetní část

2.6.1 Převod prvků na hodnoty

Hodnoty jednotlivých prvků jsou převáděny do komplexních čísel. Pro převod jsou použity následující vzorce:

- rezistor = $R + j0.0$
- induktor = $0.0 + j2\pi fL$
- kapacitor = $0.0 - j\frac{1}{2\pi fC}$
- proudový zdroj = $I + j0.0$

2.6.2 Vyplnění admitanční matice

Admitanční matice je čtvercová matice o počtu řádků a sloupců rovnajícímu se počtu neznámých uzlů. Do této matice se zapisují hodnoty admitancí prvků. Každá impedance se v admitanční matici objeví na čtyřech místech a to ve tvaru:

$$\begin{bmatrix} +\frac{1}{Z} & -\frac{1}{Z} \\ -\frac{1}{Z} & +\frac{1}{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +y & -y \\ -y & +y \end{bmatrix}$$

Například rezistor hodnoty 10Ω mezi vrcholy 1 a 2 se do admitanční matice zapíše:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{10} & -\frac{1}{10} \\ -\frac{1}{10} & \frac{1}{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1 & -0.1 \\ -0.1 & 0.1 \end{bmatrix}$$

Řádek a sloupec pro nulový vrchol se vynechává, takže prvek, který má jeden vrchol stejný jako nulový se v admitanční matici projeví jen na jednom místě.

2.6.3 Vyplnění matice proudů

Matice proudů je matice o počtu řádků jako admitanční ale jen s jedním sloupcem. Hodnoty proudů se do této matice zapisují tak, že do řádku čísla uzlu, do kterého proud vstupuje, se hodnota proudového zdroje přičte a do řádku čísla uzlu, ze kterého proud vystupuje, odečte. Například proudový zdroj o hodnotě 1 A mezi vrcholy 1 a 2, který teče směrem z uzlu 1 do uzlu 2, se v matici proudů objeví $\begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix}$.

2.6.4 Způsob výpočtu

V tuto chvíli máme vyplněnu admitanční matici a matici proudových zdrojů. Neznámou zůstává matice uzlových napětí. Po dosazení do rovnice, kde A = admitanční matice, X = matice uzlových napětí a B = matice proudů, dostaneme vztah:

$$A \cdot X = B$$

Z tohoto vztahu nyní musíme vyjádřit neznámou matici X . Rovnici vynásobíme inverzní maticí k matici A zleva, dostaneme:

$$A^{-1} \cdot (A \cdot X) = A^{-1} \cdot B$$

$$(A^{-1} \cdot A) \cdot X = A^{-1} \cdot B$$

$$I \cdot X = A^{-1} \cdot B$$

$$X = A^{-1} \cdot B$$

Výsledkem je tedy rovnice, ve které vystupuje matice proudů a inverzní matice k matici A .

2.6.5 Výpočet inverzní matice

Inverzní matici můžeme spočítat více způsoby, my použijeme metodu s jednotkovou maticí. Matici A rozšíříme přidáním jednotkové matice (na hlavní diagonále jsou 1, mimo hlavní diagonálu 0) na pravou stranu matice A.

$$\begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1n} & 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & 0 & 1 & 0 \\ A_{n1} & \cdots & A_{nn} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Poté pomocí standardních úprav nově vzniklou matici upravujeme, dokud nepřevedeme jednotkovou matici na levou stranu, na pravé straně poté máme matici inverzní.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & A_{11}^{-1} & \cdots & A_{1n}^{-1} \\ 0 & 1 & 0 & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 1 & A_{n1}^{-1} & \cdots & A_{nn}^{-1} \end{bmatrix}$$

2.6.6 Výpočet výsledných uzlových napětí

Výsledné hodnoty získáme dosazením inverzní matice a matice proudů do rovnice. Poté již jen stačí vynásobit inverzní matici maticí proudů. Výsledná hodnota určitého uzlového napětí je součtem násobků prvků z matice proudů a z příslušného řádku inverzní matice.

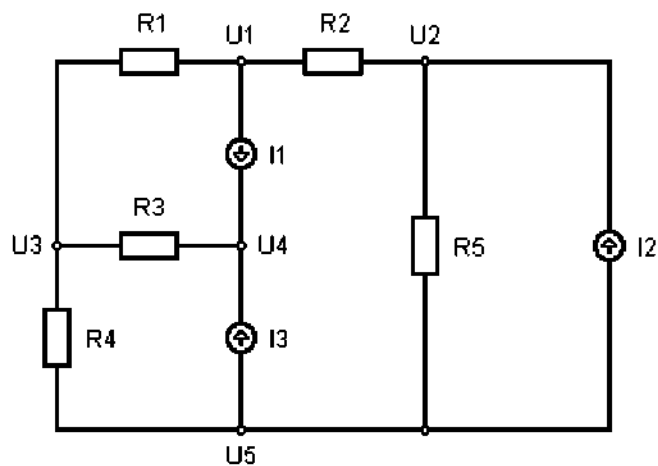
$$\begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}^{-1} & \cdots & A_{1n}^{-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1}^{-1} & \cdots & A_{nn}^{-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B_1 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix}$$

Například napětí uzlu 1 = $X_1 = A_{11}^{-1} \cdot B_1 + \cdots + A_{1n}^{-1} \cdot B_n$.

3 Příklady

3.1 Příklad 1

3.1.1 Zadání



$$R1 = 1 \, \Omega$$

$$I1 = 1 \, \text{A}$$

$$R2 = 4 \, \Omega$$

$$I2 = 3 \, \text{A}$$

$$R3 = 5 \, \Omega$$

$$I3 = 2 \, \text{A}$$

$$R4 = 10 \, \Omega$$

$$U5 = \text{nulový uzel}$$

$$R5 = 2 \, \Omega$$

$$U1, U2, U3, U4 = ?$$

3.1.2 Výpočet

Vyplnění admitanční matice:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} & -\frac{1}{R2} & -\frac{1}{R1} & 0 \\ -\frac{1}{R2} & \frac{1}{R2} + \frac{1}{R5} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R1} & 0 & \frac{1}{R1} + \frac{1}{R3} + \frac{1}{R4} & -\frac{1}{R3} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R3} & \frac{1}{R3} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{1} + \frac{1}{4} & -\frac{1}{4} & -\frac{1}{1} & 0 \\ -\frac{1}{4} & \frac{1}{4} + \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{1} & 0 & \frac{1}{1} + \frac{1}{5} + \frac{1}{10} & -\frac{1}{5} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{5} & \frac{1}{5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{5}{4} & -\frac{1}{4} & -1 & 0 \\ -\frac{1}{4} & \frac{3}{4} & 0 & 0 \\ -1 & 0 & \frac{13}{10} & -\frac{1}{5} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{5} & \frac{1}{5} \end{bmatrix}$$

Vyplnění matice proudových zdrojů:

$$B = \begin{bmatrix} -I1 \\ I2 \\ 0 \\ I1 + I3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 3 \\ 0 \\ 1 + 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 3 \\ 0 \\ 3 \end{bmatrix}$$

Výpočet inverzní matice:

$$\begin{bmatrix} \frac{5}{4} & -\frac{1}{4} & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{4} & \frac{3}{4} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & \frac{13}{10} & -\frac{1}{5} & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} \frac{5}{4} & -\frac{1}{4} & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{7}{10} & -\frac{1}{5} & 0 & \frac{1}{5} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{5} & \frac{1}{2} & -\frac{1}{5} & \frac{4}{5} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \sim$$

$$\begin{bmatrix} \frac{5}{4} & 0 & -\frac{15}{14} & 0 & \frac{15}{14} & \frac{5}{14} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{7}{10} & -\frac{1}{5} & 0 & \frac{1}{5} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{31}{70} & -\frac{1}{5} & \frac{6}{7} & \frac{2}{7} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} -\frac{5}{4} & 0 & 0 & \frac{15}{14} & -\frac{15}{14} & -\frac{5}{14} & 0 & \frac{75}{14} \\ 0 & \frac{7}{10} & 0 & -\frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & \frac{31}{70} & -\frac{1}{5} & \frac{6}{7} & \frac{2}{7} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{17}{155} & \frac{12}{31} & \frac{4}{31} & \frac{14}{31} & 1 \end{bmatrix} \sim$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{5}{4} & 0 & 0 & 0 & -\frac{165}{34} & -\frac{55}{34} & -\frac{75}{17} & -\frac{75}{17} \\ 0 & \frac{7}{10} & 0 & 0 & \frac{77}{85} & \frac{21}{17} & \frac{14}{17} & \frac{14}{17} \\ 0 & 0 & \frac{31}{70} & 0 & \frac{186}{119} & \frac{62}{119} & \frac{31}{17} & \frac{31}{17} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{17}{155} & \frac{12}{31} & \frac{4}{31} & \frac{14}{31} & 1 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \frac{35}{9} & \frac{9}{7} & \frac{7}{2} & \frac{7}{2} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \frac{9}{7} & \frac{7}{4} & \frac{7}{6} & \frac{7}{6} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \frac{5}{2} & \frac{7}{6} & \frac{33}{8} & \frac{33}{8} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \frac{7}{2} & \frac{7}{6} & \frac{37}{9} & \frac{10}{9} \end{bmatrix}$$

Inverzní matice:

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{35}{9} & \frac{9}{7} & \frac{7}{2} & \frac{7}{2} \\ \frac{9}{7} & \frac{7}{4} & \frac{7}{6} & \frac{7}{6} \\ \frac{5}{2} & \frac{7}{6} & \frac{33}{8} & \frac{33}{8} \\ \frac{7}{2} & \frac{7}{6} & \frac{37}{9} & \frac{10}{9} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,889 & 1,286 & 3,500 & 3,500 \\ 1,286 & 1,750 & 1,167 & 1,167 \\ 2,500 & 1,167 & 4,125 & 4,125 \\ 3,500 & 1,167 & 4,111 & 1,111 \end{bmatrix}$$

Výpočet výsledků:

$$\begin{bmatrix} U1 \\ U2 \\ U3 \\ U4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{35}{9} & \frac{9}{7} & \frac{7}{2} & \frac{7}{2} \\ \frac{9}{7} & \frac{7}{4} & \frac{7}{6} & \frac{7}{6} \\ \frac{5}{2} & \frac{7}{6} & \frac{33}{8} & \frac{33}{8} \\ \frac{7}{2} & \frac{7}{6} & \frac{37}{9} & \frac{10}{9} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 \\ 3 \\ 0 \\ 3 \end{bmatrix}$$

$$U1 = -1 \cdot \frac{35}{9} + 3 \cdot \frac{9}{7} + 0 \cdot \frac{7}{2} + 3 \cdot \frac{7}{2} = \frac{180}{17} = \underline{\underline{10,588 V}}$$

$$U2 = -1 \cdot \frac{9}{7} + 3 \cdot \frac{7}{4} + 0 \cdot \frac{7}{6} + 3 \cdot \frac{7}{6} = \frac{128}{17} = \underline{\underline{7,529 V}}$$

$$U3 = -1 \cdot \frac{5}{2} + 3 \cdot \frac{7}{6} + 0 \cdot \frac{33}{8} + 3 \cdot \frac{33}{8} = \frac{210}{17} = \underline{\underline{12,353 V}}$$

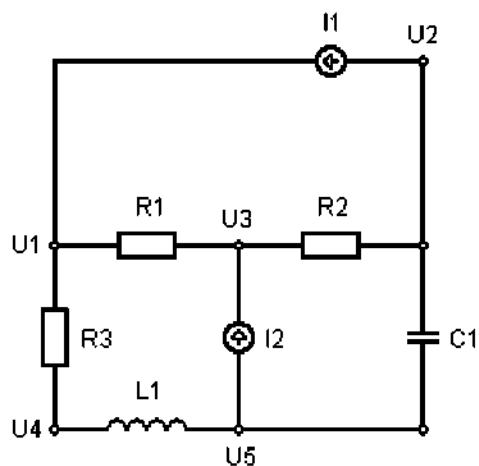
$$U4 = -1 \cdot \frac{7}{2} + 3 \cdot \frac{7}{6} + 0 \cdot \frac{37}{9} + 3 \cdot \frac{10}{9} = \frac{465}{17} = \underline{\underline{27,353 V}}$$

Výsledky z appletu:

4.11764706 0.00000000	3.52941176 0.00000000	1.17647059 0.00000000	4.11764706 0.00000000	0.00000000 0.00000000	U3= 12.3529412 0.00000000
3.52941176 0.00000000	3.88235294 0.00000000	1.29411765 0.00000000	3.52941176 0.00000000	-1.00000000 0.00000000	U1= 10.5882353 0.00000000
1.17647059 0.00000000	1.29411765 0.00000000	1.76470588 0.00000000	1.17647059 0.00000000	3.00000000 0.00000000	U2= 7.52941176 0.00000000
4.11764706 0.00000000	3.52941176 0.00000000	1.17647059 0.00000000	9.11764706 0.00000000	3.00000000 0.00000000	U4= 27.3529412 0.00000000

3.2 Příklad 2

3.2.1 Zadání



$$R1 = 6 \, \Omega$$

$$R2 = 7 \, \Omega$$

$$R3 = 8 \, \Omega$$

$$L1 = 25 \, \text{mH}$$

$$C1 = 47 \, \mu\text{F}$$

$$I1 = 2 \, \text{A}$$

$$I2 = 1 \, \text{A}$$

$$U5 = \text{nulový uzel}$$

$$f = 50 \, \text{Hz}$$

$$U1, U2, U3, U4 = ?$$

3.2.2 Výpočet

Převod hodnot do komplexních čísel:

$$Z_{R1} = 6,0 + j0,0$$

$$Z_{R2} = 7,0 + j0,0$$

$$Z_{R3} = 8,0 + j0,0$$

$$Z_{L1} = 0,0 + j2\pi fL = 0,0 + j7,854$$

$$Z_{C1} = 0,0 - j\frac{1}{2\pi fC} = 0,0 - j67,726$$

Vyplnění admitanční matice:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_{R1}} + \frac{1}{Z_{R3}} & 0 & -\frac{1}{Z_{R1}} & -\frac{1}{Z_{R3}} \\ 0 & \frac{1}{Z_{R2}} + \frac{1}{Z_{C1}} & -\frac{1}{Z_{R2}} & 0 \\ -\frac{1}{Z_{R1}} & -\frac{1}{Z_{R2}} & \frac{1}{Z_{R1}} + \frac{1}{Z_{R2}} & 0 \\ -\frac{1}{Z_{R3}} & 0 & 0 & \frac{1}{Z_{R3}} + \frac{1}{Z_{L1}} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{6,0} + \frac{1}{8,0} & 0 & -\frac{1}{6,0} & -\frac{1}{8,0} \\ 0 & \frac{1}{7,0} + \frac{1}{-j67,726} & -\frac{1}{7,0} & 0 \\ -\frac{1}{6,0} & -\frac{1}{7,0} & \frac{1}{6,0} + \frac{1}{7,0} & 0 \\ -\frac{1}{8,0} & 0 & 0 & \frac{1}{8,0} + \frac{1}{j7,854} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 0,291 + j0 & 0 + j0 & -0,167 + j0 & -0,125 + j0 \\ 0 + j0 & 0,143 + j0,015 & -0,143 + j0 & 0 + j0 \\ -0,167 & -0,143 & 0,310 + j0 & 0 + j0 \\ -0,125 + j0 & 0 + j0 & 0 + j0 & 0,125 - j0,127 \end{bmatrix}$$

Vyplnění matice proudových zdrojů:

$$B = \begin{bmatrix} I1 \\ -I1 \\ I2 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ -2 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Výpočet inverzní matice:

$$\begin{bmatrix} 0,291 & 0 & -0,167 & -0,125 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,143 + j0,015 & -0,143 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0,167 & -0,143 & 0,310 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -0,125 & 0 & 0 & 0,125 - j0,127 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \sim$$

$$\begin{bmatrix} 0,291 & 0 & -0,167 & -0,125 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,143 + j0,015 & -0,143 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0,143 & 0,214 & -0,071 & 0,571 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -0,071 & 0,071 - j0,127 & 0,429 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \sim$$

$$\begin{bmatrix} 0,291 & 0 & -0,167 & -0,125 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,143 + j0,015 & -0,143 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,073 + j0,015 & -0,071 & 0,571 & 0,989 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -0,071 & 0,071 - j0,127 & 0,429 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \sim$$

$$\begin{bmatrix}
0,291 & 0 & 0 & -0,282 & 2,255 & 2,129 & 2,197 & 0 \\
0 & 0,143 & 0 & -0,135 & 1,076 & 2,825 & 1,883 & 0 \\
0 & 0 & 0,073 & -0,071 & 0,571 & 0,989 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0,004 & 0,967 & 0,912 & 0,942 & 1
\end{bmatrix} \sim
\begin{bmatrix}
0,291 & 0 & 0 & 0 & 2,875 & 3,159 & 3,006 & 0,366 \\
0 & 0,143 & 0 & 0 & 1,472 & 3,411 & 2,367 & 0,279 \\
0 & 0 & 0,073 & 0 & 0,661 & 1,188 & 1,140 & 0,023 \\
0 & 0 & 0 & 0,004 & 0,967 & 0,912 & 0,942 & 1
\end{bmatrix} \sim
\begin{bmatrix}
1 & 0 & 0 & 0 & 9,857 & 10,833 & 10,307 & 1,256 \\
0 & 1 & 0 & 0 & 10,833 & 23,927 & 16,786 & 2,775 \\
0 & 0 & 1 & 0 & 10,307 & 16,876 & 16,570 & 1,957 \\
0 & 0 & 0 & 1 & 1,256 & 2,775 & 1,957 & 0,322
\end{bmatrix}$$

Inverzní matice:

$$A^{-1} = \begin{bmatrix}
9,857 & 10,833 & 10,307 & 1,256 \\
+j7,164 & +j5,085 & +j6,204 & +j8,444 \\
10,833 & 23,927 & 16,786 & 2,775 \\
+j5,085 & +j0,492 & +j2,965 & +j7,911 \\
10,307 & 16,876 & 16,570 & 1,957 \\
+j6,204 & +j2,965 & +j4,709 & +j8,198 \\
1,256 & 2,775 & 1,957 & 0,322 \\
+j8,444 & +j7,911 & +j8,198 & +j8,771
\end{bmatrix}$$

Výpočet výsledků:

$$\begin{bmatrix} U1 \\ U2 \\ U3 \\ U4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9,857 & 10,833 & 10,307 & 1,256 \\ +j7,164 & +j5,085 & +j6,204 & +j8,444 \\ 10,833 & 23,927 & 16,786 & 2,775 \\ +j5,085 & +j0,492 & +j2,965 & +j7,911 \\ 10,307 & 16,876 & 16,570 & 1,957 \\ +j6,204 & +j2,965 & +j4,709 & +j8,198 \\ 1,256 & 2,775 & 1,957 & 0,322 \\ +j8,444 & +j7,911 & +j8,198 & +j8,771 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 2 \\ -2 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$U1 = (9,857 + j7,164) \cdot 2 + (10,833 + j5,085) \cdot (-2) + (10,307 + j6,204) \cdot 1 + (1,256 + j8,444) \cdot 0 = \underline{\underline{8,355 + j10,363 \text{ V}}}$$

$$U2 = (10,833 + j5,085) \cdot 2 + (23,927 + j0,492) \cdot (-2) + (16,786 + j2,965) \cdot 1 + (2,775 + j7,911) \cdot 0 = \underline{\underline{-9,312 + j12,151 \text{ V}}}$$

$$U3 = (10,307 + j6,204) \cdot 2 + (16,876 + j2,965) \cdot (-2) + (16,570 + j4,709) \cdot 1 + (1,957 + j8,198) \cdot 0 = \underline{\underline{3,432 + j11,188 \text{ V}}}$$

$$U4 = (1,256 + j8,444) \cdot 2 + (2,775 + j7,911) \cdot (-2) + (1,957 + j8,189) \cdot 1 + (0,322 + j8,771) \cdot 0 = \underline{\underline{-1,080 + j9,263 \text{ V}}}$$

Výsledky z appletu:

9.85688198	10.8328827	10.3073439	1.25626614	2.00000000	U1=	8.35534237
7.16401268	5.08462664	6.20429605	8.44363486	0.00000000		10.3630681
10.8328827	23.9272757	16.8764487	2.77479476	-2.00000000	U2=	-9.31233720
5.08462664	0.49175470	2.96483959	7.91100937	0.00000000		12.1505835
10.3073439	16.8764487	16.5700076	1.95712550	1.00000000	U3=	3.43179795
6.20429605	2.96483959	4.70916230	8.19780771	0.00000000		11.1880752
1.25626614	2.77479476	1.95712550	0.32178699	0.00000000	U4=	-1.07993174
8.44363486	7.91100937	8.19780771	8.77140440	0.00000000		9.26305870

4 Závěr

Výsledkem první části této bakalářské práce je zmapování aktuální situace na poli obvodových simulátorů. Součástí textu jsou informace o základních funkcích a možnostech standardních obvodových simulátorů. Popsány jsou základní analýzy a principy práce obvodového simulátoru.

Druhá část se zabývá vytvoření jednoduchého obvodového simulátoru. Program je vytvořen jako applet v jazyce JAVA™, díky tomu ho můžeme spustit a používat na všech počítačových platformách, kde je dostupný JRE (Java™ Runtime Environment). Rozhraní programu umožňuje vložit jednoduchý obvod, pro který jsou poté vypočítána uzlová napětí. Pro názornost je použito zvýrazňování, které pomáhá orientaci v appletu. Využití by mohl najít při výuce předmětů zabývajících se elektrickými obvody.

Seznam použité literatury

- [1] Ing. ČERNÍK, Martin, Ph.D. elektronická verze přednášek předmětu Elektrické obvody, URL: <www.mti.tul.cz/cs/elo-mater>
- [2] ČAJKA, J., KVASIL, J. Teorie lineárních obvodů. (Analýza lineárních a linearizovaných elektrických obvodů). 1. vyd. Praha, SNTL/ALFA, 1979
- [3] BIOLEK, Dalibor. Řešíme elektronické obvody: aneb kniha o jejich analýze. 1. vyd. BEN - technická literatura, 2004.
ISBN/EAN 80-7300-125-X/9788073001254
- [4] ALEXANDER, Charles K., SADIKU, Matthew N. O. Fundamentals of Electric Circuits. 3. vyd. McGraw-Hill Higher Education, 2005.
ISBN 0072977183
- [5] MIKULEC, Milan, HAVLÍČEK, Václav. Základy teorie obvodů 1. 1. vyd. Nakladatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02519-5
- [6] BIOLEK, Z. Úvod do SPICE pomocí programu MicroCap. Učební texty SPŠE v Rožnově p.R. SENSIT HOLDING s.r.o., 2004
- [7] On-line dokumentace programu SPICE, Interactive User Guide, URL: <bwrc.eecs.berkeley.edu/Classes/IcBook/SPICE/UserGuide/overview_fr.html>
- [8] TINA Design Suite v8, Quick Start Manual
URL: <www.dsmm.net/distrib/en/tina8doc/TINA_8.0_manual.pdf>
- [9] On-line dokumentace Analog Circuit Simulator
URL: <falstad.com/circuit/directions.html>
- [10] OrCAD, PSpice Reference Manual, URL: <www.electronics-lab.com/downloads/schematic/013/tutorial/PSPCREF.pdf>
- [11] National Instruments, MultiSim, Getting Started with NI Circuit Design Suite
URL: <www.ni.com/pdf/manuals/374482c.pdf>
- [12] Spectrum Software, Micro-Cap Manuals
User's Guide, URL: <www.spectrum-soft.com/down/ug.pdf>
Reference Guide, URL: <www.spectrum-soft.com/down/rm.pdf>
- [13] On-line dokumentace QUCS, URL: <qucs.sourceforge.net/docs.html>
- [14] Lubomír Brůha. Java: Hotová řešení. 1. vyd. Computer Press a.s., 2006.
ISBN/EAN 80-251-0072-3/978-80-2510-072-1
- [15] Darwin, Ian F., JAVA: Kuchařka programátora. 1. vyd. Computer Press a.s., 2006. ISBN/EAN 80-251-0944-5/978-80-2510-944-1

- [16] Sharon Zakhour, Scott Hommel, Jacob Royal, Isaac Rabinovitch, Tom Risser, Mark Hoeber. Java 6, Výukový kurz. 1. vyd. Computer Press a.s., 2007.
ISBN/EAN 80-251-1575-6/978-80-251-1575-6
- [17] Sun Microsystems, JDK6 referenční dokumentace JAVA, URL:
<www.java.com>
- [18] Java Boutique. URL: <javaboutique.internet.com>
- [19] Java portál. URL: <java.cz>
- [20] Wikipedia. URL: <cs.wikipedia.org>
- [21] Google. URL: <www.google.cz>