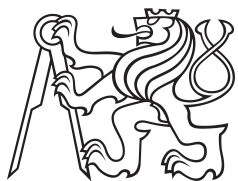


Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra teorie obvodů

Analýzy v grafickém editoru elektrotechnických obvodů

Ondřej Bukovský

Vedoucí: doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka
Studijní program: Elektronika a komunikace
Květen 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bukovský** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **465957**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra teorie obvodů**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Analýzy v grafickém editoru elektrotechnických obvodů

Název bakalářské práce anglicky:

Analysis in schematic editor of electronic circuits

Pokyny pro vypracování:

Provedte rešerši vlastností simulátorů elektrických a elektronických obvodů včetně 'Grafického editoru elektrotechnických obvodů' (GEEC) psaného v jazyce JavaScript a zaměřte se na možnosti analýz. Vylepšete možnosti analýz: současné zobrazení více typů analýz z různým nastavením, manuální nastavení rozsahů os grafů, parametrické grafy s uživatelskou volbou parametru a jejich začlenění do tzv. 'Fast analysis'. Vytvořte nový způsob výběru výsledků analýz, včetně všech proudů obvodu a linearizovaných parametrů nelineárních prvků. Na závěr zhodnoťte a porovnejte možnosti GEEC s podobnými web-aplikacemi. Postup konzultujte s vedoucím práce.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Paulů F.: Grafický editor elektrotechnických obvodů, diplomová práce, ČVUT 2015.
- [2] Tuma T., Burmen A.: Circuit Simulation with SPICE OPUS Theory and Practice, Birkhauser Boston, a part of Springer Science+Business Media, LLC 2009, ISBN: 978-0-8176-4866-4.
- [3] <http://www.w3schools.com/js/default.asp>
- [4] <http://www.freeda.org/doc/SPICE/spice.pdf>
- [5] <http://www.html5canvastutorials.com/>
- [6] Micro-Cap 9: Schématický editor a smíšený analogové-digitální analyzátor. <http://www.spectrum-soft.com>
- [7] Koblíha O.: Aplikace pro interaktivní analýzu elektrických obvodů, <https://asinus.feld.cvut.cz/pracan/>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka, katedra teorie obvodů FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **18.02.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.02.2021**

doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Radoslav Bortel, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Poděkování patří především doc. Dr. Ing. Jiřímu Hospodkovi, za cenné rady a perfektní spolupráci při vedení této bakalářské práce. Dále pak Ing. Filipovi Paulů za uvedení do editoru.

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, 20. května 2019

Abstrakt

Tato práce se zabývá simulacemi elektro-technických obvodů. Konkrétně pak realizací analýz v Grafickém editoru elektro-technických obvodů (GEEC) psaného v programovacím jazyce JavaScript. Dále jsou zde popsány základní funkce tohoto editoru. A také jeho nově přidané či upravené funkce. Popsána je tu také práce se simulátorem Spice OPUS a matematickým programem Maple a jeho knihovnou PraCAN, což je knihovna pro symbolickou analýzu obvodů.

Klíčová slova: GEEC, Spice OPUS, PraCAN, Maple, JavaScript, Analýzy obvodů

Vedoucí: doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka
Katedra teorie obvodů,
Technická 2,
Praha 6

Abstract

This thesis is focused on analyses of electrical circuits. Especially on the realization of the analyses in Graphic editor of electrical circuits (GEEC) written in JavaScript. Next, there are described the basic functionalities and new features of GEEC. The analyses of circuits are executed by Spice OPUS and Maple with PraCAN library.

Keywords: GEEC, Spice OPUS, PraCAN, Maple, JavaScript, Circuit analysis

Title translation: Analysis in schematic editor of electronic circuits

Obsah

1 Úvod	1
2 Simulátory elektrotechnických obvodů	3
2.1 Rešerše simulátorů	4
2.1.1 TINA	4
2.1.2 Micro-Cap	4
2.1.3 Multisim	4
2.1.4 CircuitLab	4
2.1.5 LTspice	5
2.1.6 Spice OPUS	5
2.1.7 PraCAn	8
3 Grafický editor elektrotechnických obvodů	11
4 Nové možnosti v analýzách	13
4.1 Analýzy implementované v Spice OPUS	14
4.1.1 OP analýza	14
4.1.2 DC analýza	15
4.1.3 AC analýza	16
4.1.4 Transientní analýza	17
4.2 Analýzy implementované v PraCAn	18
4.2.1 Spínané kapacitory	18
4.2.2 OP analýza	18
4.2.3 AC analýza	18
4.2.4 TF analýza	19
4.2.5 Transientní analýza	20
4.3 Komponenta Dropdown	21
4.4 Manuální nastavení rozsahů os .	21
4.5 Zobrazení více typů analýz	23
4.6 Způsob výběru výsledků	24
4.7 Přenosová funkce	26
4.8 Grafy s parametrem	27
4.9 Fast analysis	29
5 Závěr	31
Literatura	33
Seznam použitých zkratk	35

Obrázky

3.1 Vzhled editoru.	11
4.1 Ukázka výpisu výsledků OP analýzy.	14
4.2 Nastavení DC analýzy.	15
4.3 Nastavení AC analýzy.	16
4.4 Nastavení Transientní analýzy. .	17
4.5 Výpočet rezonanční frekvence. . .	18
4.6 Nastavení TF analýzy.	19
4.7 Nastavení Transientní analýzy PraCAN.	20
4.8 Příklad použití změny rozsahu osy Y.	22
4.9 Změna vzhledu logaritmické osy.	22
4.10 AC analýza jedné frekvence. . .	24
4.11 Příkazy Maple.	24
4.12 Ukázka výpisu výsledků.	25
4.13 Ukázka výběru výrazu k vykreslení.	26
4.14 Výpis numerických výsledků TF analýzy.	27
4.15 Voltampérová charakteristika diody při různých teplotách.	28
4.16 Ukázka Fast analysis.	29
4.17 Obvod s ideálním OZ.	29

Tabulky

2.1 Hodnoty TF analýzy vrácené příkazem print all.	7
2.2 Hodnoty PZ analýzy vrácené příkazem print all.	8

Kapitola 1

Úvod

S rozvojem výpočetní techniky se rozšiřuje i její uplatnění. Jeden z mnoha příkladů využití jsou i simulace elektrotechnických obvodů, které dnes můžeme provádět i na osobních počítačích.

Simulace nám umožňuje předem odhadnout vlastnosti daného obvodu. Odhad je to z toho důvodu, že ne vždy se jedná o lineární úlohu. Proto je nutná linearizace a následné řešení numerickými metodami, které spolu s linearizací nám do výpočtu zanáší nepřesnost. Nicméně nám přináší velkou úsporu času při návrhu a optimalizacích elektrotechnických obvodů. Uplatnění také nachází ve výuce. K tomu byl také mimo jiné i vytvořen Grafický editor elektrotechnických obvodů dále jen GEEC. Což je webová aplikace napsaná v jazyce JavaScript. A to má obrovskou výhodu, v tom že ji uživatel nemusí instalovat do svého počítače, ale je k dispozici online na adrese <http://asinus.feld.cvut.cz/geec/>

GEEC byl původně určen pouze pro kreslení obvodů a export netlistu do aplikace „Aplikace pro interaktivní analýzu elektrických obvodů“ [15]. Ale Ing. Filip Paulů, jenž je autorem GEEC [5], přidal možnost základních analýz, které budu dále modifikovat a přidávat nové funkce.

Předtím zde ale budou uvedeny některé známé simulátory a to především z hlediska možnosti analýz. Dále bude podrobněji popsán simulátor Spice OPUS a jeho analýzy, které se budou využívat. Podrobnější zmínka bude také o knihovně PraCAN pro symbolické analýzy.

Kapitola 2

Simulátory elektrotechnických obvodů

K simulaci elektrotechnických obvodů je potřeba mít k dispozici elementární modely elektrických prvků (rezistory, kapacitory, induktory a ideální zdroje napětí a proudu) popsané matematickými rovnicemi. Z těchto elementárních prvků pak lze modelovat již reálné součástky jako jsou například kondenzátory, cívky a tranzistory. Modely reálných součástek mohou být jakkoliv složité v závislosti na účelu simulace. Samozřejmě čím složitější model tím delší doba výpočtu, ale tím věrnější výsledky. Z reálných součástek pak lze složit výsledný obvod, který chceme simulovat [2].

K popisu obvodu a jeho zapojení slouží netlist. Konkrétně bude popsána struktura netlistu Spice OPUSu na ukázce kódu 2.1. První řádek je vždy název obvodu. Další řádky už jsou popis zapojení. První písmeno je identifikátor součástky (R rezistor, L induktor, C kapacitor, Q bipolární tranzistor a tak dále) následuje (bez mezery) název, který může být sekvencí písmen a čísel. Poté jsou názvy uzlů, mezi které je součástka připojena. Nakonec v závislosti na součástce jsou její parametry nebo název modelu [6].

U simulačních programů s integrovaným editorem obvodů není potřeba se zabývat netlistem, protože je vygenerován na základě nakresleného obvodu.

Ukázka kódu 2.1: Netlist tranzistorového zesilovače.

```
amplifier
Vin 8 0 dc 0 ac 1 0 sin 0 5m 10k 0 0
$Sinusový zdroj 5mV 10kHz, pro AC analýzu 1V a fáze 0.
Vdd 3 0 dc 10 $DC zdroj 10V mezi uzly 0 a 3.
Q1 6 4 0 mod1 $BJT mezi uzly 6, 4 a 0 s modelem mod1.
R1 3 4 150k $Rezistor 150kOhm uzly 3 a 4.
R2 3 6 1k $Rezistor 1kOhm uzly 3 a 6.
C1 1 4 1u $Kapacitor 1uF uzly 1 a 4.
C2 6 out 1u $Kapacitor 1uF uzly 6 a out.
R3 out 0 1meg $Rezistor 1MOhm uzly out a 0.
.MODEL mod1 npn bf=100 $Definice modelu mod1.
```

2.1 Rešerše simulátorů

V této kapitole bude popsáno několik nejznámějších simulátorů elektrotechnických obvodů, a to zejména jejich možnosti analýz.

Simulátory se dělí podle typů obvodů, které umožňuje simulovat. A to na analogové a digitální, pak tu jsou takové, které mají označení „Mixed-Mode“, ty si poradí s analogovými i digitálními obvody. Lišit se také mohou v reprezentaci výsledků. Existují numerické (nejčastější), semisymbolické a symbolické.

2.1.1 TINA

Tina je komplexní software pro návrh a analýzu elektrotechnických obvodů. Umožňuje analyzovat analogové, digitální a rádiové obvody, simulovat mikrokontroléry a komponenty definované v HDL (Hardware Description Languages). Má i svou online verzi TINACloud, která může sloužit i jako úložiště projektů. Taktéž lze navrhovat desky plošných spojů. Co se týče analýz, jsou zde k dispozici AC, DC a Transient jak v numerické, tak symbolické formě, dále pak Noise, Fourier, Stress Analýzy a další [17].

2.1.2 Micro-Cap

Micro-Cap 12 je aktuální verze editoru a simulátoru obvodů od firmy Spectrum Software [16]. Jde o simulátor smíšený analogově-digitální. Má velkou podporu SPICE, dokáže číst, zapisovat a vytvářet standardní SPICE textové soubory. Provádí numerické AC, DC, Transient, Transfer Function, Distortion, Stability, Stress a další analýzy. Také má například návrhový program aktivních a pasivních filtrů a následné zobrazení Bodeho charakteristiky, impulsové a přechodové odezvy.

2.1.3 Multisim

Multisim je editor a simulátor obvodů spadající pod společnost National Instruments [14]. Opět velká podpora SPICE. Taktéž má svou online verzi pod názvem MultisimLive, která obsahuje pouze základní typy analýz. Oproti tomu klasická verze mimo základní analýzy umožňuje Parameter sweep, Noise, Fourier, Distortion, Transfer Function, Pole Zero analýzy a další.

2.1.4 CircuitLab

CircuitLab je webový schématický editor a simulátor, který byl vytvořen studenty Massachusettského technologického institutu (MIT) pro podporu výuky elektrotechnických obvodů. Implementovány má OP, DC sweep, AC a Transient analýzy [13].

■ 2.1.5 LTspice

LTspice je editor a simulátor obvodů vytvořen společností Linear Technology, která je nyní součástí Analog Devices. Díky tomu má rozsáhlou knihovnu modelů součástek od obou výrobců. K dispozici má analýzy typu AC, DC, Transient, Transfer Function a Noise [12].

■ 2.1.6 Spice OPUS

Spice OPUS je volně dostupný simulační program analogových obvodů. Nemá grafické rozhraní a hlavní důvod jeho zmínky je použití v numerických analýzách GEEC. Byl vytvořen na Elektrotechnické fakultě Univerzity v Lublani. Vychází z původního SPICE z Kalifornské univerzity v Berkeley [9] a XSPICE z Georgijského technologického výzkumného ústavu (GTRI) [11].

Spice je zkratka Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis tedy Simulační program s důrazem na integrované obvody. Zkratka OPUS je OPTimalization UtilitieS, tedy v tomto simulátoru jsou implementovány optimalizační algoritmy [6].

Rozsáhlá příručka k tomuto simulátoru je literatura [6], která popisuje modelování a simulaci obvodů, matematické pozadí a několik příkladů. A je důležitým zdrojem informací pro tuto kapitolu.

■ OP analýza

OP (Operating Point) analýza počítá operační bod obvodu (Stacionární ustálený stav). Tedy všechny kapacitory jsou nahrazeny rozpojeným obvodem a induktory zkratem. Pokud u zdrojů není definován průběh napětí nebo proudu, počítá se OP z *dc* parametru zdroje. Je-li však průběh definován a zároveň není definován *dc* parametr, pak se OP počítá z času $t=0$ daného průběhu.

Analýza se provádí příkazem *op*, poté se může použít *print all*. To vypíše všechna uzlová napětí a proudy napěťovými zdroji a induktory.

■ DC analýza

DC analýza taktéž počítá operační bod, s tím že, umožňuje měnit parametry obvodu. Nazývá se to rozmítání parametru (parameter sweep).

Příkaz může vypadat například takto: *dc v1 0 10 0.5*, kde *v1* je dc hodnota napěťového zdroje a hodnoty se budou měnit od 0 do 10 po 0.5. A to znamená, že se pro 21 hodnot *v1* provede interně OP analýza. Není to však stejné, jako kdybychom 21-krát manuálně zavolali příkaz *op*. A to kvůli využití výsledku z předchozího kroku pro použití jako počáteční bod následujícího kroku. Tím se sníží počet iterací algoritmu Newtonovy metody tečen a je tak urychlen celkový výpočet.

■ AC analýza

AC analýza počítá frekvenční závislost obvodu v harmonickém ustáleném stavu. Jako první se vypočítá operační bod a provede se linearizace obvodu. Pro tuto analýzu je u nezávislých zdrojů důležitý parametr *ac*, který představuje magnitudu (tedy velikost), případně může být zadána i fáze. U zdrojů, které tento parametr nemají, platí, že napěťové jsou zkratovány a proudové rozpojeny.

Analýza se provádí například příkazem *ac lin 100 10 20k*, kde *lin* znamená lineární krok pro 100 bodů v rozsahu od 10 do 20 kHz. Výsledkem jsou komplexní čísla, ze kterých následně můžeme spočítat velikost a fázi dané veličiny.

■ Transientní analýza

Transientní analýza vyhodnocuje obvod v časové doméně. Díky tomu lze zobrazit průběhy veličin v závislosti na čase. Důležitým parametrem při spouštění analýzy je *uic* (use initial conditions), tedy použití počátečních podmínek. Pokud *uic* není zadán, počítá se operační bod a následně se z něho vychází. Je-li *uic* zadán, berou se v úvahu uživatelem zadané počáteční podmínky. Nejsou-li zadány, považují se jako nulové.

Ukázka příkazu může vypadat takto: *tran 10u 1m 0*, kde se začíná od 0 s do 1 ms s krokem 10 μ s, *uic* zde není zadáno.

■ TF analýza

TF (Transfer Function)¹ analýza určuje stejnosměrný přenos obvodu definovaný mezi dvěma body. Výpočet vychází z operačního bodu obvodu a výsledkem jsou vstupní a výstupní impedance a přenos. Příkaz je ve formátu *tf output input*, kde *input* může být nezávislý zdroj napětí či proudu. *Output* může být uzlové napětí, rozdílové napětí (mezi uzly například v(1,2)) a proud zdrojem či induktorem.

Jak taková analýza může vypadat ukazuje kód 2.2, kde analyzovaným obvodem je dělič napětí. Výsledky jsou vypsány pomocí příkazu *print all* a zobrazeny v tabulce 2.1.

Ukázka kódu 2.2: Příklad TF analýzy

```
Delic napeti
V2 1 0 dc 10
R1 1 2 1k
R2 2 0 5k
.end
.control
tf v(2) v2
print all
.endc
```

Tabulka 2.1: Hodnoty TF analýzy vrácené příkazem `print all`

Výstupní veličina	Hodnota
<code>input_impedance</code>	6.000000e+03
<code>output_impedance</code>	8.333333e+02
<code>transfer_function</code>	8.333333e-01

■ Noise analýza

Noise (šumová)¹ analýza počítá spektrum šumu. Opět vychází z pracovního bodu a linearizace obvodu. Každý příspěvek šumu je simulován jako zdroj proudu, připojený na místo, kde se generuje šum. Velikost tohoto proudu je závislá na pracovním bodě a frekvenci. Příkaz pro provedení analýzy je `noise output input sweeptype nsteps start stop`, kde `output` je výstupní uzlové napětí, `input` je vstupní nezávislý zdroj napětí či proudu. `Sweeptype` a `nsteps` je rozložení a počet bodů. `Start` a `stop` je počáteční a koncová frekvence.

■ PZ analýza

PZ (Pole-Zero)¹ analýza počítá póly a nuly přenosové funkce obvodu ve frekvenční oblasti. Postup je následující. Vypočítá se operační bod a provede se linearizace obvodu. Všechny nezávislé proudové zdroje (včetně těch s nenulovým `ac` parametrem) jsou odpojeny. Nezávislé zdroje napětí s nulovým parametrem `ac` jsou zkratovány, v případě nenulového parametru rozpojeny.

Příkaz je ve tvaru `pz in+ in- out+ out- type results`, kde `in/out` jsou vstupní/výstupní uzly. `Type` určuje, zda je výstupní napětí podělené vstupním napětím (`vol`) nebo proudem (`cur`). `Results` určuje, co bude počítáno zda póly (`pol`), nuly (`zer`) nebo obojí (`pz`). Kód 2.3 ukazuje příklad výpočtu pólů a nul jednoduchého RC článku. Tabulka 2.2 pak výsledky, které jsou v komplexním tvaru (reálná část, imaginární část). `Pole` je pól s násobností (`polevalid`) jedna. `Zerovalid` je nulové, takže není žádná nula (`zero`).

Ukázka kódu 2.3: Příklad PZ analýzy

```
RC clanek
v1 1 0 dc 0 ac 1
R1 1 2 500k
C1 2 0 1u
.end
.control
pz 1 0 2 0 vol pz
print all
.endc
```

¹Tyto analýzy již nejsou implementovány v GEEC

Tabulka 2.2: Hodnoty PZ analýzy vrácené příkazem print all

Výstupní veličina	Hodnota
pole	-2.00000e+00,0.000000e+00
polevalid	1.000000e+00,0.000000e+00
zero	0.000000e+00,0.000000e+00
zerovalid	0.000000e+00,0.000000e+00

2.1.7 PraCAn

PraCAn (Prague Circuit Analyser) [3],[4] je knihovna pro symbolickou analýzu elektrických obvodů programu v Maple [10], která byla vytvořena Jiřím Hospodkou a Janem Bičákem na této fakultě.

Program Maple je určen pro symbolické výpočty, má zázemí pro numerické řešení diferenciálních rovnic a hledání integrálů. Má také pokročilé grafické funkce. Lze ho využít pro výuku analytické geometrie, také v diferenciálním a integrálním počtu, ve výuce posloupností a řad, algebry a v dalších částech matematiky [19].

Příkaz pro analýzu spojitě pracujících obvodů má následující podobu $PraCAn(\text{netlist}, \text{typ analýzy}, \langle \text{symbolic} \rangle, \langle \text{SAVE} \rangle)$, kde *symbolic* je volitelný parametr pro označení, zda se jedná o numerickou nebo symbolickou analýzu. *SAVE* je také volitelný parametr a udává, co se má vypsát. Standardně vrací vztahy pro uzlová napětí a proudy napětovými zdroji, kapacitory a indukty. Možnosti výpisu mohou být: *SAVE=nodes*, *SAVE=branches*, *SAVE=currents* a jiné.

OP analýza

OP analýza počítá operační bod obvodu jak v symbolické, tak v numerické formě. Jak se taková analýza provádí je ukázáno na děliči napětí, jehož netlist je definován kódem 2.4.

Ukázka kódu 2.4: Netlist děliče napětí

```
netlist := "
V1 1 0 dc 10 ac 1 0 sin 0 1 10k 0 0
R1 1 2 1k
R2 2 0 4k
.end "
```

Příkaz $PraCAn(\text{netlist}, \text{dc})$ pak vrátí následující výsledky

$$\left\{ i("V1") = -\frac{1}{500}, v("1") = 10, v("2") = 8 \right\}.$$

Podobně pak pro symbolickou analýzu $PraCAn(\text{netlist}, \text{dc}, \text{symbolic})$

$$\left\{ i("V1") = -\frac{V1}{R2+R1}, v("1") = V1, v("2") = \frac{R2 V1}{R2+R1} \right\}.$$

■ AC analýza

Výsledkem této analýzy jsou vztahy pro napětí a proudy závislé na frekvenci. Obvod pro výpočet bude RC článek s netlistem 2.5.

Ukázka kódu 2.5: Netlist RC článku

```
netlist := "
V1 1 0 dc 0 ac 1
R1 1 2 1k
C1 2 0 10n
.end "
```

Analýza se provede příkazem $PraCAN(netlist, ac, SAVE=nodes)$, kde výsledkem budou jen uzlová napětí v semisymbolické formě

$\{v("1") = 1.0, v("2") = \frac{100000.0}{(6.283185308 if + 100000.0)}\}$. V grafických analýzách se z takových vztahů vychází, přičemž dosazením frekvence se dopočítávají funkční hodnoty, které jsou vykresleny. Symbolické výrazy se získají příkazem $PraCAN(netlist, ac, symbolic, SAVE=nodes)$, opět pouze uzlová napětí

$$\{v("1") = V1, v("2") = \frac{V1}{2iCI\pi fRI+1}\}.$$

■ Transientní analýza

Výsledkem této analýzy jsou vztahy pro napětí a proudy závislé na čase. Tedy dosazením konkrétního času pak lze získat hodnotu napětí či proudu v daném časové okamžiku, popřípadě pak časový průběh v daném časovém intervalu.

Ukázkový příklad bude opět proveden na děliči napětí 2.4. Příkaz

$PraCAN(netlist, tran, SAVE=v("2"))$ vrátí semisymbolickou formu uzlového napětí $v(2)$ $\{v("2") = \frac{4}{5} \sin(20000 \pi t)\}$. Symbolický výraz pak $PraCAN(netlist, tran, symbolic, SAVE=v("2"))$, a výsledkem je $\{v("2") = \frac{R2 \sin(20000 \pi t)}{R2+R1}\}$.

■ TF analýza

TF analýza v PraCANu se zásadně liší od TF analýzy ve Spicu. Výsledkem této analýzy jsou vztahy pro napětí a proudy v Laplaceových obrazech. Přenosová funkce RC článku 2.5, je pak pouhé podělení uzlových napětí $v(2)$ a $v(1)$. Pro ukázkou této analýzy byl použit příkaz Maplu $subs(seznam\ proměnných, výraz)$ [10], který provádí substituci proměnných ze seznamu do zadaného výrazu. Tedy přenosovou funkci v numerické podobě vrátí $subs(PraCAN(netlist, tf, SAVE=nodes), v("2")/v("1"))$ jako $\frac{100000}{(s+100000)}$. Symbolický výraz pak $subs(PraCAN(netlist, tf, symbolic, SAVE=nodes), v("2")/v("1"))$ s výsledkem $\frac{1}{(CI RI s + 1)}$.

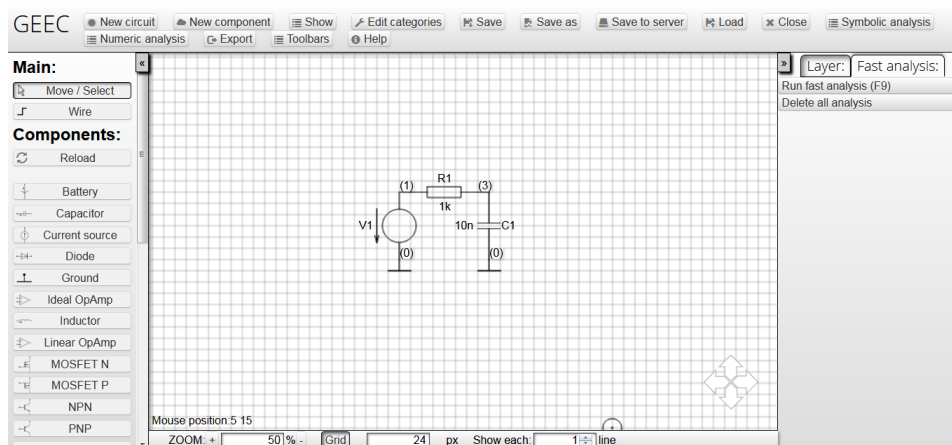
■ PZ analýza

Výsledkem této analýzy jsou póly a nuly, a to jak v numerické, tak symbolické podobě. Opět se využije RC článek 2.5. Výpočet nul a pólů přenosu ze vstupu na uzel 2 provádí příkaz `PraCAN(netlist,pz,SAVE=v("2"))` s výsledkem `[], [-100000]`, tedy žádná nula a jeden pól roven -100000. Symbolicky to pak je `PraCAN(netlist,pz,symbolic,SAVE=v("2"))` s výsledkem `[], [-1/CI*RI]`.

Kapitola 3

Grafický editor elektrotechnických obvodů

GEEC je webová aplikace napsaná v jazyce JavaScript, ve standartu ES6 (ECMAScript6). Pomocí AJAX (Asynchronous JavaScript and XML) se pak komunikuje se serverem, na kterém jsou spouštěny PHP skripty. Ty mohou oproti JavaScriptu přistupovat k databázím a souborům. Pro databáze je použit systém MySQL, který slouží k ukládání součástek, obvodů a mnoho dalšího. PHP skripty také spouští programy Spice OPUS a Maple na analýzu obvodů. Grafické analýzy jsou vykresleny pomocí knihovny D3 [8].



Obrázek 3.1: Vzhled editoru.

Na obrázku 3.1 je zobrazen celý editor. **Levá lišta** souží k výběru součástek, spojovacího vodiče a nástrojů pro kreslení. **Horní lišta** obsahuje hlavní ovládací prvky editoru, které jsou:

- **New circuit** je vytvoření nového obvodu.
- **New component** je vytvoření nové součástky.
- **Show** je volba zobrazení elementů (tag, value, contact point, contact point name, current).
- **Edit categories** je možnost vytvářet, přejmenovávat a mazat kategorie součástek.

- **Save** je uložení obvodu nebo součástky.
- **Save as** je uložení nového obvodu nebo součástky.
- **Save to server** je uložení obvodu do databáze.
- **Load** je načtení obvodu z databáze nebo ze souboru.
- **Close** je ukončení projektu, vše nakreslené se smaže.
- **Symbolic analysis** jsou analýzy prováděné v PraCANu. Obsahuje OP, AC, TF a Transientní analýzy v symbolické a semisymbolické podobě. Jedná se o okno s tabulkovým výpisem všech vypočtených výsledků, které lze přidat do Fast analysis. Při větším počtu výsledků se tato realizace stává nepřehledná. Analýzy AC, TF a Transientní mají možnost i grafického zobrazení. Jejich konfigurační formuláře obsahují pouze údaje nutné pro analýzu, není možné třeba měnit rozsah os. Zadávání veličin je za pomoci výběru ze seznamu, kde ale není možné zadat například podíl či rozdíl uzlových napětí.
- **Numeric analysis** jsou analýzy prováděné v Spice OPUSu. Obsahuje OP, DC, AC a Transientní analýzy. OP je stejně jako u Symbolických analýz vypisována do tabulkového seznamu. Ostatní analýzy jsou pouze grafické, na stejný způsob jako u Symbolických. Zadávání veličin je zde řešeno textboxem (textovým polem), což umožňuje zadat podíl či rozdíl uzlových napětí. Na druhou stranu zde chybí výběr proměnných a uživatel, který nezná syntaxi Spicu, může mít velké problémy.
- **Export** zde jsou možnosti k exportu právě otevřeného projektu (Netlist pro Spice, Netlist pro PraCAN, PostScript, PDF, LaTeX, JPG, PNG, Worksheet pro Maple, Netlist do aplikace [15]).
- **Toolbars** je nastavení, které další lišty jsou zobrazeny.
- **Help** obsahuje hlavně klávesové zkratky.

Pravá lišta obrázku 3.1 je složena ze dvou částí Layer a Fast analysis. Layer je seznam všech použitých objektů. Lze je upravovat a mazat. Fast analysis slouží k ukládání numerických a symbolických výsledků analýz. Výsledky lze pouze přidávat, mazat a přepočítávat (například při změně parametrů obvodu), bez jakékoliv editace.

Na konec je tu nejdůležitější část editoru **kreslící plocha**. Obsahuje mřížku, díky které je pevně dáno, kde může být součástka umístěna. Velikost mřížky je možné také měnit na spodní liště, kde je i mimo jiné nastavení zoomu. V pravém dolním rohu jsou šipky, pomocí nichž se lze pohybovat [5].



Kapitola 4

Nové možnosti v analýzách

V této kapitole budou popsány některé nové nebo vylepšené možnosti týkající se analýz v programu GEEC. Hlavním důvodem bylo vylepšení stávajících a přidání nových funkcionalit pro širší využití tohoto programu. Neméně podstatným důvodem bylo usnadnit uživateli práci a udělat toto prostředí více přívětivější.

4.1 Analýzy implementované v Spice OPUS

4.1.1 OP analýza

OP analýza zobrazí okno s numerickými výsledky seřazené do podsložek podle toho k jaké součástce patří. Vzhled ukazuje obrázek 4.1. Ve spodní části je tlačítko „Add item“ pro přidání vlastního výsledku, který je vypočítán z již zobrazených výsledků pomocí dostupných matematických operací. Lze použít základní operace sčítání, odčítání, násobení a dělení. Dále lze použít funkce $abs(x)$ (výpočet absolutní hodnoty), $db(x)$ (převod na decibely), $round(x)$, $floor(x)$, $ceil(x)$ (zaokrouhlení) a mnoho dalších [6].

OP Analysis

▼ Nodes		
Name	Value	Fast analysis
v(1)	3.868788e + 00	Add
v(3)	8.031826e - 01	Add
v(4)	1.000000e + 01	Add
▶ Q1		
▼ RB		
Name	Value	Fast analysis
@rb[i]	3.065606e - 05	Add
@rb[p]	2.819382e - 04	Add
▼ RC		
Name	Value	Fast analysis
@rc[i]	3.065606e - 03	Add
@rc[p]	1.879588e - 02	Add
▶ V1		
▼ Optional		
Name	Value	Fast analysis
@q1[ic]/@q1[ib]	1.000000e + 02	Add Delete
v(1)-v(3)	3.065605e + 00	Add Delete
round(v(1)-v(3))	3.000000e + 00	Add Delete
Add item		

Obrázek 4.1: Ukázka výpisu výsledků OP analýzy.

4.1.2 DC analýza

Pro DC analýzu numerického simulátoru Spice OPUS byl vylepšen formulář, který nabízí uživateli jednoduše nadefinovat analýzu. Jednotlivé parametry analýzy jsou popsány níže. Příklad formuláře je na obrázku 4.2.

- **X axis** určuje nezávislou proměnnou, tedy X-ovou osu grafu. Může to být jak parametr instance součástky, tak modelu.
- **From** je počátek intervalu X-ové osy, tedy počáteční hodnota parametru z **X axis**.
- **To** je konec intervalu X-ové osy, tedy koncová hodnota parametru z **X axis**.
- **Number of points** určuje v kolika bodech z intervalu **From** - **To** se bude počítat závisle proměnná, tedy parametr **Y axis**.
- **X axis type** určuje rozložení bodů z **Number of points**. Na výběr je lineární a logaritmické.
- **Parameter** umožňuje vykreslit DC analýzu při různých hodnotách zadaného parametru. Více kapitola 4.8.
- **Manual Y range** umožňuje manuálně nastavit rozsah Y-ové osy, který je jinak automatický. Více v kapitole 4.4.
- **Y axis** určuje závislou proměnnou, kterou může být uzlové napětí, proud zdrojem či induktorem nebo vlastnosti součástek počítané simulátorem. Vykreslit se dá více proměnných, oddělených čárkou.

Parameter a **Manual Y range** mají rozbalovací strukturu, tedy kliknutím se dají rozbalit či sbalit, a na tom také závisí, jestli budou použity nebo ne.

Obrázek 4.2: Nastavení DC analýzy.

4.1.3 AC analýza

Pro AC analýzu numerického simulátoru Spice OPUS byl vylepšen formulář, který nabízí uživateli jednoduše nadefinovat analýzu. Jednotlivé parametry analýzy jsou popsány níže. Příklad formuláře je na obrázku 4.3.

- **One frequency** při zaškrtnutí se nezobrazí graf ale hodnoty veličiny z **Item** při jedné frekvenci. Více kapitola 4.5.
- **From** je počáteční frekvence.
- **To** je koncové frekvence.
- **Number of points** určuje v kolika bodech z intervalu **From** - **To** se bude počítat závisle proměnná, tedy **Item**.
- **X axis type** určuje rozložení bodů z **Number of points**. Na výběr je lineární a logaritmické.
- **Parameter** umožňuje vykreslit AC analýzu při různých hodnotách zadaného parametru. Více kapitola 4.8.
- **Manual Y range** umožňuje manuálně nastavit rozsah Y-ové osy, který je jinak automatický. Pro možnost „Magnitude and Phase“ z **Type of graph** je zde navíc změna rozsahu fáze. Více v kapitole 4.4.
- **Type** je měřítko Y-ové osy (lineární nebo v decibelech).
- **Type of graph** určuje co se má vykreslit. Možnosti jsou: Magnitude and Phase, Magnitude, Phase, Real a Imaginary.
- **Item** určuje závislou proměnnou, kterou může být uzlové napětí, proud zdrojem či induktorem nebo vlastnosti součástek počítané simulátorem. Vykreslit se dá více proměnných, oddělených čárkou.

Parameter a **Manual Y range** mají rozbalovací strukturu, tedy kliknutím se dají rozbalit či sbalit, a na tom také závisí, jestli budou použity nebo ne.

Obrázek 4.3: Nastavení AC analýzy.

4.1.4 Transientní analýza

Pro Transientní analýzu numerického simulátoru Spice OPUS byl vylepšen formulář, který nabízí uživateli jednoduše nadefinovat analýzu. Jednotlivé parametry analýzy jsou popsány níže. Příklad formuláře je na obrázku 4.4.

- **From** je počáteční čas.
- **To** je koncový čas.
- **Step** určuje krok s jakým se bude počítat časový průběh veličiny z **Y axis**.
- **Use Initial Conditions** zaškrtnutím se počítá s počátečními podmínkami. Více v kapitole 4.5.
- **X axis type** určuje rozložení časové osy. Na výběr je lineární a logaritmické.
- **Parameter** umožňuje vykreslit Transientní analýzu při různých hodnotách zadaného parametru. Více kapitola 4.8.
- **Manual Y range** umožňuje manuálně nastavit rozsah Y-ové osy, který je jinak automatický. Více v kapitole 4.4.
- **Y axis** určuje závislou proměnnou, kterou může být uzlové napětí, proud zdrojem či induktorem nebo vlastnosti součástek počítané simulátorem. Vykreslit se dá více proměnných, oddělených čárkou.

Parameter a **Manual Y range** mají rozbalovací strukturu, tedy kliknutím se dají rozbalit či sbalit, a na tom také závisí, jestli budou použity nebo ne.

Obrázek 4.4: Nastavení Transientní analýzy.

4.2 Analýzy implementované v PraCAN

Symbolické analýzy s výjimkou OP mají vždy tři možnosti. A to výpis symbolických, semisymbolických výsledků a grafické analýzy. Semisymbolické výsledky jsou symbolické výsledky, kde se dosadí numerické hodnoty, až na proměnnou závislou na dané analýze. Tedy v AC frekvence f , v Tranzientní čas t a v TF komplexní proměnná s . Grafická analýza má téměř totožný vzhled jako analýza pro Spice.

Knihovna PraCAN v syntaxi uzlových napětí používá uvozovky, což je zřejmě z ukázek kódů kapitoly 2.1.7. Tento nesoulad se syntaxí Spice mohl být pro uživatele matoucí. Proto v uživatelském rozhraní GEEC byly tyto uvozovky odebrány a pracuje se s nimi až v pozadí programu.

Pro zobrazení matematických vztahů na webové stránce sloužil formát MathML (Mathematical Markup Language), do kterého Maple uměl převádět. Jenže některé prohlížeče tento formát nepodporují, toto bylo řešeno pomocí knihovny MathJax, která měla také své nevýhody [5]. Novým řešením se stala knihovna Katex [7], která je mnohokrát rychlejší. Využívá syntaxi Latexu, do kterého Maple také umí převádět.

4.2.1 Spínané kapacity

Knihovna PraCAN také dokáže pracovat se spínanými kapacitami. Kromě OP a symbolické Transientní analýzy lze využít jakoukoliv analýzu. V grafických analýzách se při přidání periodického spínače do obvodu přidá políčko pro zadání spínací frekvence. A následně lze provést analýzu [5].

4.2.2 OP analýza

Jak bylo zmíněno OP analýza nemá grafickou analýzu. Vypisují se pouze symbolické a semisymbolické výsledky. Nad těmito výsledky lze dále vykonávat maple příkazy. Více v kapitole 4.6.

4.2.3 AC analýza

Grafická AC analýza má totožný vzhled jako pro Spice analýzu popsanou v kapitole 4.1.3. Výhodou symbolických výsledků je analytický tvar v závislosti na frekvenci, ze kterého dále lze vypočítat například rezonanční frekvenci (obrázek 4.5). Výpočet byl realizován derivací uzlového napětí $v(3)$ podle frekvence a následného vypočítání kořenů.

▼ Optional

Name	Value	Fast analysis
$v(3)$	$\frac{62831.85308 \sqrt{-39.47841762 f^2 + 62831.85308 \sqrt{f^2 + 1000000000000.0}}}{f}$	Add Delete
$\text{abs}(\text{solve}(\text{diff}(v(3), f), f)[1])$	50329.21209	Add Delete

Obrázek 4.5: Výpočet rezonanční frekvence.

4.2.4 TF analýza

Pro TF analýzu symbolického simulátoru na základě knihovny PraCAN v programu Maple byl vylepšen formulář, který nabízí uživateli jednoduše nadefinovat analýzu. Jednotlivé parametry analýzy jsou popsány níže. Příklad formuláře je na obrázku 4.6.

- **Type of analysis** je výběr grafické analýzy v časové nebo frekvenční (f a ω) oblasti. Nebo také v podobě symbolických a semisymbolických formulí.
- **Impulse** je výběr vstupního signálu pro časovou oblast. A to Diracův impuls nebo Heavisideova funkce (jednotkový skok).
- **From** je počáteční hodnota (frekvence nebo času)
- **To** je koncová hodnota (frekvence nebo času)
- **Number of points** určuje v kolika bodech z intervalu **From** - **To** se bude počítat TF
- **X axis type** je výběr lineární nebo logaritmické X-ové osy.
- **Manual Y range** umožňuje manuálně nastavit rozsah Y-ové osy, který je jinak automatický. Více v kapitole 4.4.
- **Type** je výběr lineárního nebo decibelového měřítka Y-ové osy.
- **Type of graph** určuje co se má vykreslit (pouze ve frekvenční oblasti). Možnosti jsou: Magnitude and Phase, Magnitude, Phase, Real a Imaginary.
- **Input gate** a **Output gate** jsou vstupní a výstupní brány pro definici přenosu.

TF analysis

Type of analysis:

Impulse:

From:
 s

To:
 s

Number of points:

X axis type:

▶ **Manual Y range**

Y axis:
Type:

Type of graph:

Input gate:

Output gate:

Obrázek 4.6: Nastavení TF analýzy.

4.2.5 Transientní analýza

Pro Transientní analýzu symbolického simulátoru na základě knihovny PraCAN v programu Maple byl vylepšen formulář, který nabízí uživateli jednoduše nadefinovat analýzu. Jednotlivé parametry analýzy jsou popsány níže. Příklad formuláře je na obrázku 4.7.

- **Specific time** při zaškrtnutí se nezobrazí graf ale Transientní semisymbolická analýza s dosaženým časem z **From**.
- **From** je počáteční čas.
- **To** je koncový čas.
- **Number of points** určuje v kolika bodech z intervalu **From** - **To** se bude počítat časový průběh veličiny z **Y axis**.
- **Use Initial Conditions** toto políčko je vždy zaškrtnuté a nejde odškrtnout. PraCAN totiž vždy počítá s počátečními podmínkami.
- **X axis type** určuje rozložení časové osy. Na výběr je lineární a logaritmické.
- **Manual Y range** umožňuje manuálně nastavit rozsah Y-ové osy, který je jinak automatický. Více v kapitole 4.4.
- **Y axis** určuje závislou proměnnou, kterou může být uzlové napětí, napětí na součástkách a proud tekoucí součástkami.

Transient

Time:
Specific time:

From:
 s

To:
 s

Number of points:

Use Initial Conditions:

X axis type:

▶ **Manual Y range**

Y axis:

Obrázek 4.7: Nastavení Transientní analýzy PraCAN.

4.3 Komponenta Dropdown

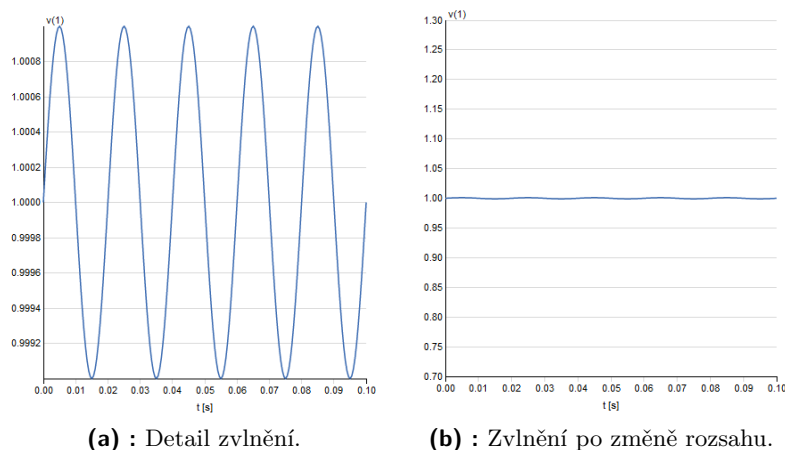
Dropdown je komponenta, která při kliknutí rozbalí nebo sbalí svůj obsah. Skládá se z trojúhelníkové ikony, která pro sbalený obsah míří doprava, pro rozbalený obsah míří dolů, dále vedle ikony je umístěn nadpis. Jak tato struktura vypadá je vidět například na obrázku 4.12 nebo 4.13. Obsah se předává parametrem *children* z kódu 4.1. Nejčastěji je to HTML element *div*, který obsahuje strukturu dalších elementů. Obsahem pak může být cokoliv, což umožňuje široké využití, například pro výběr obvodů uložených na serveru, výpis výsledků analýz, výběr proměnných a jiné. Hlavní úkolem této komponenty je zlepšit přehlednost při zobrazení velkého počtu dat.

Ukázka kódu 4.1: Princip Dropdown komponenty.

```
export default ({ title, name, display, children }) => {
  const blockIco = <span className="glyphicon glyphicon-triangle-right" />;
  const block = <div style={{ display: display }}>{children}</div>;
  const header = <h3 style={{ cursor: "pointer" }} onClick={() => {
    if (block.style.display !== "none") {
      block.style.display = "none";
      blockIco.className="glyphicon glyphicon-triangle-right";
      block.parentElement.name=name+"DropHide";
    } else {
      block.style.display = "block";
      blockIco.className="glyphicon glyphicon-triangle-bottom";
      block.parentElement.name=name+"DropShow";
    }
  }}>
  {blockIco} {title}
</h3>;
  return <div>{header}{block}</div>;
}
```

4.4 Manuální nastavení rozsahů os

Rozsah os grafů uživatel nemusí téměř řešit. Vodorovná osa je dána rozmezím hodnot, ve kterých bude konkrétní analýza počítat hodnoty zadaného výrazu. Toto rozmezí se zadává pomocí textových polí v konfiguraci analýzy popsané v kapitolách 4.1 a 4.2. Rozsah svislé osy je určen hodnotami vypočtených ze simulace. Tento způsob nemusí být vždy vyhovující. Příkladem může být nepatrné zvlnění na konstantním napětí (obrázek 4.8a). Rozsah svislé osy se pak nastaví mezi minimální a maximální hodnotu zvlnění, a lze tak vidět jeho detaily. Ne vždy je tento jev žádoucí, proto bylo zapotřebí přidat možnost manuálního nastavení svislé osy, které je detailněji popsáno také v kapitolách 4.1 a 4.2. Po jeho použití lze vidět původní konstantní napětí na obrázku 4.8b.



Obrázek 4.8: Příklad použití změny rozsahu osy Y.

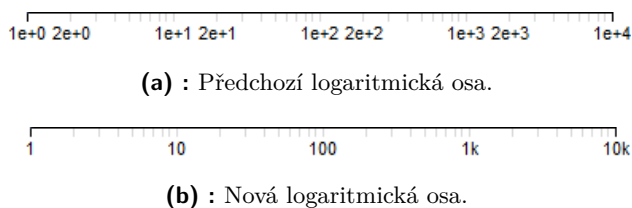
Dále je třeba zmínit funkci automatické změny měřítka jak pro vodorovnou, tak svislou osu. Na příklad v transienční analýze se podle rozsahu hodnot vodorovné, tedy časové osy mění jednotka sekundy na ms, μ s, ns a další. Svislé ose se pouze přidá multiplikační konstanta 10^x , kde x jsou násobky tří. Jednotky se zde neuvádějí z důvodu mnoha možností, co lze vykreslit a bylo by obtížné zjišťovat o jakou jednotku se jedná.

Princip funkce automatické změny měřítka je založen na použití dekadického logaritmu, pro určení o kolika místné číslo se jedná. Ale nejdříve je potřeba zjistit střední hodnotu rozsahu jako rozdíl maximální a minimální hodnoty podělený dvěma. Dále podle

$$\frac{\log_{10}(|\bar{x}|)}{3}, \quad (4.1)$$

kde $|\bar{x}|$ je absolutní hodnota ze střední hodnoty. Logaritmus je dělen třemi aby výsledkem byly násobky tří základní jednotky tedy mili, mikro, nano, na druhou stranu kilo, mega, giga a další. Výsledek vztahu 4.1 je pak zaokrouhlen, a odpovídá indexu v tabulce předpon a multiplikačních konstant, které se přidávají k popisu os.

Byla též provedena vizuální změna popisu logaritmické osy viz obrázek 4.9. Původní popis byl v exponenciálním tvaru, což nebylo úplně přehledné. Nynější zobrazení je v dekadických násobcích, které je přehlednější a elegantnější.



Obrázek 4.9: Změna vzhledu logaritmické osy.

4.5 Zobrazení více typů analýz

V původní verzi bylo možné zobrazit vždy jen jedno okno s grafickou analýzou, a uživatel byl omezen na použití pouze jednoho okna, tedy na jeden typ analýzy. Pokud byla potřeba zobrazit analýzu jiného nebo stejného typu, ale s rozdílnou konfigurací, bylo nutné opustit stávající analýzu.

Proto od tohoto konceptu bylo ustoupeno. A v současnosti jde zobrazit jakýkoliv typ a počet analýz. Čímž byly předchozí problémy vyřešeny. Navíc přibyla možnost uložení do Fast analysis ve formě minigrafu, na toto téma více v kapitole 4.9.

V Tranzientní analýze byl přidán checkbox (zaškrtačací políčko) „Use Initial Conditions“ na obrázku 4.4. Podle zaškrtnutí se rozhoduje, zda bude použit u příkazu *tran* parametr *uic* či nikoliv. Funkce *uic* je blíže popsána v kapitole 4.1.4. Dříve byl tento parametr zadán defaultně, a nebyla možnost při zobrazení průběhu vycházet z pracovního bodu.

Novou podobu získala analýza jedné frekvence viz obrázek 4.10. Po zaškrtnutí checkboxu „One frequency“ se zamezí přepisu nepotřebných údajů pro tuto analýzu. Kód pro Spice pak vypadá podle 4.2. Vektor $v(3)$ je v tomto případě komplexní o velikosti 1, tudíž jedno komplexní číslo. Z něj se pak dopočítávají ostatní položky: velikost (Magnitude) 4.2, velikost v dB 4.4, fáze 4.3 a fáze v radiánech 4.5. Vše je pak možné pomocí tlačítka „Add“ přidat do Fast analysis.

Ukázka kódu 4.2: Výpočet fázoru pro jeden kmitočet.

```
RLC
V1 1 0 dc 0 ac 1m
C1 3 0 10n
R1 1 2 50
L1 2 3 1m
.end
.control
ac lin 1 50k 50k
print v(3)
.endc
```

$$|z| = \sqrt{(\Re(z))^2 + (\Im(z))^2} \quad (4.2)$$

$$\varphi = \arctan(\Im(z)/\Re(z)) \quad (4.3)$$

$$U_{dB} = 20 \log(U) \quad (4.4)$$

$$\varphi_{rad} = \frac{\pi \cdot \varphi}{180} \quad (4.5)$$

AC analysis

One frequency:

 From: Hz
 To: Hz
 Number of points:
 X axis type:

► Parameter

Y axis:
 Type:
 Type of graph:
 Item:

Name	Value	Fast analysis
Frequency [Hz]	50000	
Magnitude	0.00634	<input type="button" value="Add"/>
Magnitude [dB]	-43.95222	<input type="button" value="Add"/>
Phase [°]	-85.25462	<input type="button" value="Add"/>
Phase [rad]	-1.48797	<input type="button" value="Add"/>
Real	0.00052	<input type="button" value="Add"/>
Imaginary	-0.00632	<input type="button" value="Add"/>

Obrázek 4.10: AC analýza jedné frekvence.

4.6 Způsob výběru výsledků

Protože se počet vypisovaných výsledků mnohonásobně zvětšil. A to přidáním dalších vlastností součástek, které lze počítat. Například pro NPN tranzistor proudy I_c, I_b, I_e , ztrátový výkon a mnohé další. Bylo nutné vytvořit novou strukturu vypisování. Vytvořil se seznam použitých součástek a Nodes (uzlová napětí) jako položky, na které se klikne, a zobrazí se výsledky související s danou součástkou. Ukázka této struktury je na obrázku 4.12. Při otevření tohoto okna jsou všechny položky sbaleny až na uzlová napětí. Tím je zajištěna lepší orientace a přehled ve výsledcích. Uživatel pak může libovolně rozbalovat jen výsledky, které ho zajímají.

▼ Optional

Name	Value	Fast analysis
$v(3)/v(1)$	$1000 (s + 1000)^{-1}$	<input type="button" value="Add"/> <input type="button" value="Delete"/>
$\text{solve}(\text{denom}(v(3)/v(1)), s)$	-1000	<input type="button" value="Add"/> <input type="button" value="Delete"/>

Obrázek 4.11: Příkazy Maple.

Dále nad těmito výsledky lze provádět základní matematické operace a mnoho příkazů z programu Maple (pouze pro Symbolické analýzy). Přidávají se tlačítkem „Add item“ ve spodní části okna, a jsou automaticky přidávány do položky Optional. Obrázek 4.11 ukazuje příklad použití Maple příkazů pro výpočet pólů přenosové funkce $v(3)/v(1)$. Funkce $\text{denom}(\text{zlomek})$ vrací jmenovatele zadaného zlomku, a funkce $\text{solve}(\text{výraz}, s)$ vrací kořeny výrazu s proměnnou s .

AC Analysis

Substitution: Ok To decimal

▼ Nodes

Name	Value	Fast analysis
v(1)	$V1$	Add
v(2)	$\frac{2 \cdot iC1 \cdot V1 \cdot \pi \cdot fR1}{2 \cdot iC1 \cdot \pi \cdot fR1 + 1}$	Add

▼ C1

Name	Value	Fast analysis
i(C1)	$\frac{2 \cdot iC1 \cdot V1 \cdot \pi \cdot f}{2 \cdot iC1 \cdot \pi \cdot fR1 + 1}$	Add
v(C1)	$\frac{V1}{2 \cdot iC1 \cdot \pi \cdot fR1 + 1}$	Add

▼ R1

Name	Value	Fast analysis
i(R1)	$\frac{2 \cdot iC1 \cdot V1 \cdot \pi \cdot f}{2 \cdot iC1 \cdot \pi \cdot fR1 + 1}$	Add
v(R1)	$\frac{2 \cdot iC1 \cdot V1 \cdot \pi \cdot fR1}{2 \cdot iC1 \cdot \pi \cdot fR1 + 1}$	Add

▼ V1

Name	Value	Fast analysis
i(V1)	$\frac{-2 \cdot iC1 \cdot V1 \cdot \pi \cdot f}{2 \cdot iC1 \cdot \pi \cdot fR1 + 1}$	Add
v(V1)	$V1$	Add

▼ Optional

Name	Value	Fast analysis
v(2)^(1)	$\frac{2 \cdot iC1 \cdot \pi \cdot fR1}{2 \cdot iC1 \cdot \pi \cdot fR1 + 1}$	Add

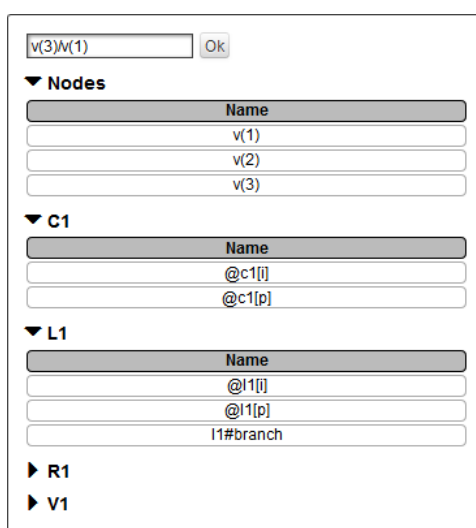
Add item

Obrázek 4.12: Ukázka výpisu výsledků.

Konkrétně obrázek 4.12 je ze symbolických analýz prováděných v PraCANu, kde je možné provádět substituci i více proměnných. Také bylo přidáno tlačítko „To decimal“, které se uplatní hlavně v semisymbolických analýzách. V případě, že výsledky jsou ve tvaru zlomku, lze je převést na desetinné číslo.

Pro zlepšení možnosti výběru veličiny, která se bude zobrazovat v grafických analýzách, se použil podobný princip jako u výpisu výsledků. Inspirace byla převzata z aplikace [15]. Funkce je následující. Při kliknutí na danou možnost se její obsah přidá do horního textboxu. Veličin může být více, ale oddělené čárkou. Dovoleny jsou také základní aritmetické operace. Poté, co si uživatel dokončí výběr, klikne na tlačítko „Ok“ a jeho výběr je přenesen do hlavního okna s konfigurací analýzy. Jak takový výběr může vypadat ukazuje obrázek 4.13. Tento způsob výběru je výhodnější hlavně pro ty uživatele, kteří neznají syntaxi Spice OPUSu či PraCANu.

Takováto možnost výběru je použita ve třech případech. Pro volbu parametru v parametrických analýzách více v kapitole 4.8. Na výběr tu je z parametrů instance součástky (například teplota součástky) a z parametrů modelu součástky (pro NPN tranzistor například beta). Dále pro volbu nezávislé proměnné, a to jen v DC analýze, kde je výběr stejný jako u parametru. Výjimkou je volba závislé proměnné, tedy svislé osy, kde se vybírá z uzlových napětí, proudů (zdroji a indukty) a vlastností součástek počítané simulátorem (pro NPN například proudy I_c , I_b , I_e , U_{be} , U_{ce} , g_m a jiné).



Obrázek 4.13: Ukázka výběru výrazu k vykreslení.

4.7 Přenosová funkce

Grafická TF analýza, jež byla popsána v kapitole 4.2.4 byla rozšířena o následující možnosti. Kromě toho, že umí vykreslit TF analýzu ve frekvenční oblasti v závislosti na f a v časové oblasti, přibyla možnost vykreslení v závislosti na úhlové frekvenci ω .

Mimo grafického zobrazení impulsové a přechodové odezvy byla doplněna možnost zobrazení symbolických a semisymbolických vztahů pro tyto odezvy, a to jak v časové oblasti, tak v Laplaceově transformaci.

Kód 4.3 ukazuje způsob výpočtu výsledků TF analýzy, které jsou na obrázku 4.14. Pro ilustraci byl vybrán obvod děliče napětí s rezistory R1 a R2, kde paralelně k R2 je připojen kapacitor C1. PraCAN v TF analýze vrátí napětí a proudy v Laplaceových obrazech, tedy podělením uzlových napětí $v(3)$ a $v(1)$ dostaneme přenosovou funkci. Z funkce se určí obraz přechodové odezvy (odezva na jednotkový skok $1(t)$) jako

$$W(s) = H(s) \cdot \mathcal{L}\{1(t)\} = H(s) \cdot \frac{1}{s}. \quad (4.6)$$

$H(s)$ a $W(s)$ se převedou na parciální zlomky pomocí příkazu *convert* a příznaku *parfrac*. Tento tvar je výhodný, protože se z něj lépe provádí inverzní Laplaceova transformace. K tomu slouží příkaz *invlaplace* z knihovny *inttrans* [10]. A výsledkem je impulzní $h(t)$ a přechodová $w(t)$ odezva [1].

Ukázka kódu 4.3: Výpočet TF analýzy v programu Maple

```
with(PraCAN):
with(inttrans):
netlist := "
V1 1 0 dc 0 ac 1
R1 1 3 1k
```

```

R2 3 0 1k
C1 3 0 10n
.end ":
vysledky := PraCAN(netlist , tf , numeric , SAVE = all ):
Hs:=simplify (subs (vysledky ,(v ("3"))/(v ("1")))):
Ws:=Hs/s :
Wsp:=convert (Ws, parfrac , s ):
Hsp:=convert (Hs, parfrac , s ):
ht:=invlaplace (Hsp, s , t ):
wt:=invlaplace (Wsp, s , t ):
[W(s)=Ws,H(s)=Hs,Wparfrac(s)=Wsp,
Hparfrac(s)=Hsp,h(t)=ht,w(t)=wt];

```

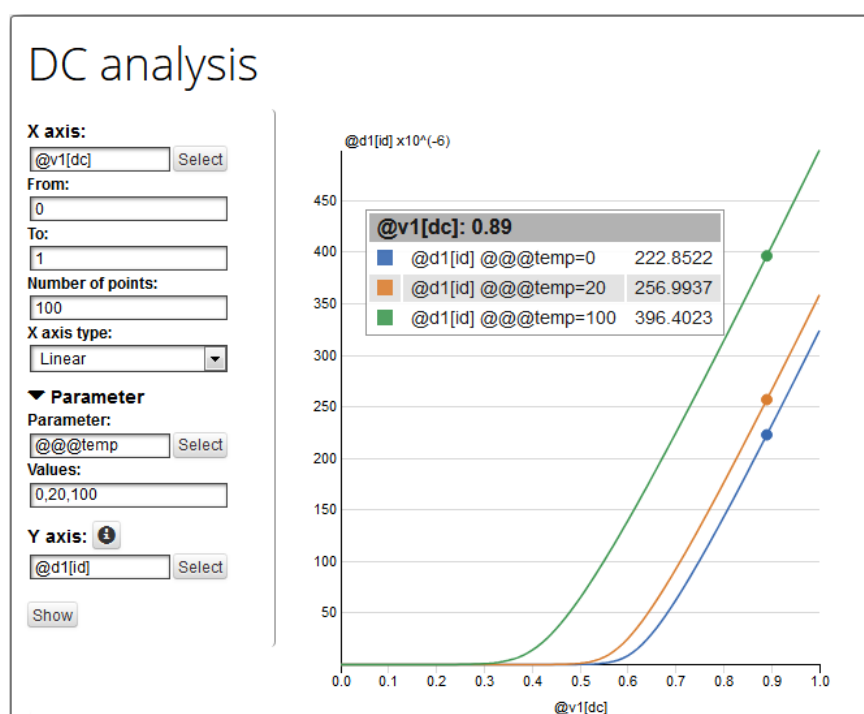
Name	Value	Fast analysis
H(s)	$100000 (s + 200000)^{-1}$	Add
W(s)	$100000 \frac{1}{(s+200000)s}$	Add
h(t)	$100000 e^{-200000 t}$	Add
w(t)	$-1/2 e^{-200000 t} + 1/2$	Add
Hparfrac(s)	$100000 (s + 200000)^{-1}$	Add
Wparfrac(s)	$-1/2 (s + 200000)^{-1} + 1/2 s^{-1}$	Add

Obrázek 4.14: Výpis numerických výsledků TF analýzy.

4.8 Grafy s parametrem

Úplnou novinkou jsou zde parametrické grafy. Jsou dostupné v Numerické DC, AC a Transientní analýze. Je to velmi užitečná možnost s širokým uplatněním. Lze ji využít při hledání optimální hodnoty parametru součástky. Umožňuje porovnávat chování obvodu při změně parametru. Typickým příkladem je třeba vykreslení voltampérové charakteristiky bipolárního tranzistoru pro různé báze proudy. Provádí se změna napětí mezi kolektorem a emitorem, a sleduje proud kolektorem (DC analýza). Nebo sledování zkruslení výstupního signálu při různých amplitudách vstupního signálu zesilovače (Transientní analýza). A nebo pozorování šířky pásma rezonančního obvodu při různých hodnotách rezistoru (AC analýza).

Parametr se volí ve stejnojmenné sekci na obrázku 4.15. Hodnoty se zadávají do textboxu níže, v libovolném pořadí či počtu. Nicméně s vyšším počtem se snižuje přehlednost zobrazovaných výsledků.



Obrázek 4.15: Voltampérová charakteristika diody při různých teplotách.

Spice OPUS celkem jednoduše umí změnit parametry součástek, aniž by se musel měnit netlist obvodu, a to pomocí příkazu *let*. Příklad realizace parametrické analýzy ukazuje kód 4.4. Vždy se nastaví parametr na nějakou hodnotu a provede se analýza. Výsledkem jsou čtyři sloupce: frekvence (ta je výchozí) a třikrát uzlové napětí v(3), vždy pro jinou hodnotu odporu R1.

Ukázka kódu 4.4: Změna parametru a následná analýza.

```
let @r1[r]=10
ac dec 50 1k 1meg
let @r1[r]=100
ac dec 50 1k 1meg
let @r1[r]=200
ac dec 50 1k 1meg
print ac1.v(3) ac2.v(3) ac3.v(3)
```

4.9 Fast analysis

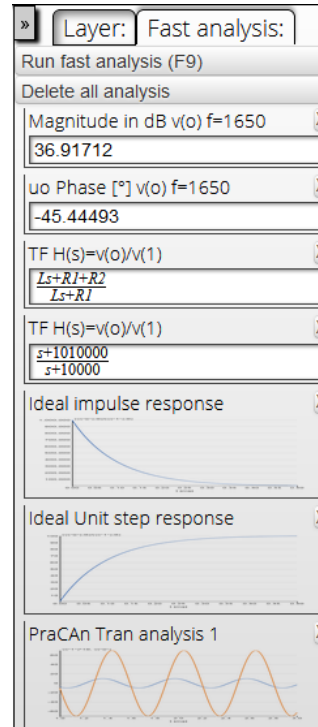
Fast analysis je jedna z unikátních vlastností GEEC. Jedná se o panel v pravé části editoru, který lze i minimalizovat. Základní verze již byla známa z [5]. Ta ovšem nabízela jen přidání či odebrání základních numerických a symbolických výsledků. Oproti tomu aktuální vylepšená verze umožňuje mnoho nových možností.

První novinkou je přidáním tlačítka pro smazání všech uložených analýz, což může často usnadnit uživateli práci.

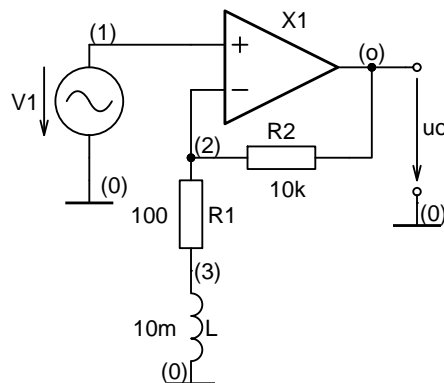
Další možností je změna popisu daného výsledku, a to dvojitým klikem. Dříve tato operace nebyla možná, protože se popis používal pro identifikaci veličiny a z jaké analýzy pochází. Tento nedostatek byl vyřešen přidáním proměnné „alias“, do které se ukládá uživatelem zadaný popis.

Dále bylo umožněno interaktivní řazení výsledků pomocí přetáhnutí na jiné místo (Drag and Drop). Toto umožňuje standart HTML5, kde se danému objektu nastaví vlastnost draggable a nadefinují funkce ondragstart, ondragover, ondragleave a ondrop [18]. Definice funkcí je nastíněna kódem 4.5.

Poslední a asi nejzásadnější věc je přidání minigrafů. Při jakékoliv grafické analýze lze kliknout na tlačítko „Add Fast analysis“ ve spodní části okna s analýzou, a tím přidat minigraf do Fast analysis. Velká výhoda spočívá v tom, že kliknutím na minigraf se otevře okno s analýzou, a již nadefinovanými parametry dané analýzy. Uplatnění to může mít jako interaktivní výukový materiál. Příklad, jak by mohl vypadat výsledný panel Fast analysis pro obvod 4.17 je na obrázku 4.16, kde jsou jak numerické, tak symbolické výsledky a také minigrafy.



Obrázek 4.16: Ukázka Fast analysis.



Obrázek 4.17: Obvod s ideálním OZ.

Ukázka kódu 4.5: Definování funkcí.

```

onDrop = { (ev) => {
  ev.preventDefault();
  const data = ev.dataTransfer.getData("text");
  let tmpHtml = "";
  let old = 0, neu = 0;
  let ok = false;
  if (ev.target.className === "input" ||
      ev.target.className === "title" ||
      ev.target.className === "layerImage") {
    tmpHtml = ev.target.parentElement.innerHTML;
    neu = ev.target.parentElement.id;
    ev.target.parentElement.innerHTML = document.getElementById(data).innerHTML;
    ok = true;
  }
  if (ev.target.className === "layer") {
    tmpHtml = ev.target.innerHTML;
    neu = ev.target.id;
    ev.target.innerHTML = document.getElementById(data).innerHTML;
    ok = true;
  }
  if (ok) {
    old = document.getElementById(data).id;
    document.getElementById(data).innerHTML = tmpHtml;
    analysis.updateFastAnalysis(parseInt(old), parseInt(neu));
  }
}}
onDragOver = { (ev) => {
  ev.preventDefault();
  if (ev.target.className === "input" ||
      ev.target.className === "title" ||
      ev.target.className === "layerImage") {
    ev.target.parentElement.className = "layer active";
  }
  if (ev.target.className === "layer") {
    ev.target.className = "layer active";
  }
}}
onDragLeave = { (ev) => {
  if (typeof ev.target.className === "undefined") {
    let elem = document.getElementById("fastAnalysis").firstChild;
    do {
      if (elem.className === "button") {
        continue;
      }
      elem.className = "layer";
    } while (elem = elem.nextSibling);
    return;
  }
  if (ev.target.className === "input" ||
      ev.target.className === "title" ||
      ev.target.className === "layerImage") {
    ev.target.parentElement.className = "layer";
  }
  if (ev.target.className === "layer active") {
    ev.target.className = "layer";
  }
}}
onDragStart = { (ev) => {
  ev.dataTransfer.setData("text", ev.target.id);
}}

```

Kapitola 5

Závěr

Cílem této práce bylo navázat na práci [5] a pokračovat v zdokonalování a rozšiřování funkcí Grafického editoru elektrotechnických obvodů. Tento editor umožňuje nejen kreslení elektrotechnických obvodů ale i součástek, které dokáže exportovat do nejrůznějších formátů včetně PDF, Latexu a grafických formátů PNG a JPEG. Následně nakreslené obvody lze podrobit simulaci prostřednictvím aplikací Spice OPUS a knihovny PraCAN programu Maple. K dispozici jsou zde symbolické analýzy OP, AC, TF a transientní. Numerické analýzy OP, DC, AC a transientní. Bylo umožněno zobrazení více analýz najednou. V Numerických analýzách byla přidána možnost grafů s parametrem. Vylepšena byla možnost výběru a výpisu výsledků. Nechybí možnost manuálního nastavení rozsahu os grafů. Velká změna nastala v tzv. Fast analysis, kde přibyla možnost editace názvů výsledků, seřazení výsledků dle uživatele a přidání minigrafů. Aplikace je také propojena s katalogem součástek a umožňuje výběr reálných modelů součástek.

Oproti většině aplikací má tato aplikace podstatnou výhodu v možnosti symbolických analýz, kreslení vlastních součástek a panelu Fast analysis pro ukládání a rychlý přístup k výsledkům, které lze také přepočítávat. Další věc, která stojí za zmínku je, že mnoho simulátorů má oddělené konfigurační okno analýzy a samotný graf. Oproti tomu GEEC má toto v jednom okně, což přináší výhodu, že se uživatel může okamžitě vrátit k nastavení a změnit ho.

V tomto okamžiku vývoj této aplikace ještě nekončí. Je zde stále mnoho věcí k vylepšení. Stále je tu prostor pro nové možnosti a to ve všech směrech. Co se týče analýz je v plánu implementace PZ analýz, přibýt by mohla i Fourierova analýza.



Literatura

- [1] BIČÁK, Jan, Miloš LAIPERT a Miroslav VLČEK. *Lineární obvody a systémy*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03649-5.
- [2] BIOLEK, Dalibor. *Modelování a počítačová simulace přednášky: Elektronický učební text FEKT VUT Brno* [online]. c2003 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <http://www.unium.cz/materialy/vut/fekt/bmps-modelovani-a-pocitacova-simulace-p24402.html>
- [3] HOSPODKA, Jiří a Jan BIČÁK. PraCAn — Maple Package for Symbolic Circuit Analysis. In: *Digital Technologies 2008* [online]. Žilinská univerzita, Elektrotechnická fakulta, 2008 [cit. 2019-04-14]. ISBN 978-80-8070-953-2.
- [4] HOSPODKA, Jiří a Jan BIČÁK. Web-Based Application for Electric Circuit Analysis. In: *2009 Fourth International Multi-Conference on Computing in the Global Information Technology* [online]. IEEE, 2009, 2009, s. 157-160 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1109/ICCGI.2009.31. ISBN 978-1-4244-4680-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5279858/>
- [5] PAULŮ, Filip. *Grafický editor elektrotechnických obvodů*. ČVUT, 2015. Diplomová práce. ČVUT FEL.
- [6] TUMA, Tadej a Árpád BÜRMEIN. *Circuit simulation with SPICE OPUS: theory and practice*. Boston: Birkhäuser, c2009. Modeling and simulation in science, engineering & technology. ISBN 9780817648671.
- [7] *KATEX: The fastest math typesetting library for the web*. [online]. c2019 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://katex.org/>
- [8] *D3: Data-Driven Documents* [online]. c2019 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://d3js.org/>
- [9] *The Spice Page* [online]. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <http://bwrcs.eecs.berkeley.edu/Classes/IcBook/SPICE/>
- [10] *Maplesoft: Software for Mathematics, Online Learning, Engineering* [online]. c2019 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <https://www.maplesoft.com/>

- [11] *Spice OPUS Licence* [online]. c2008 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <http://www.spiceopus.si/license.html>
- [12] *Analog Devices-LTspice: Mixed-signal and digital signal processing ICs* [online]. c1995-2019 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/index.html>
- [13] *CircuitLab: Online circuit simulator and schematic editor* [online]. c2019 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://www.circuitlab.com/>
- [14] *Multisim: National Instruments-Automated Test and Automated Measurement Systems* [online]. c2019 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <http://www.ni.com/cs-cz.html>
- [15] *Aplikace pro interaktivní analýzu elektrických obvodů* [online]. c2009 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <https://asinus.feld.cvut.cz/pracan/>
- [16] *Spectrum Software: Micro-Cap 12. Analog simulation, mixed mode simulation, and digital simulation software.* [online]. c2019 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <http://www.spectrum-soft.com/index.shtm>
- [17] *TINA: Analog, Digital, MCU and Mixed Circuit Simulator* [online]. c2019 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://www.tina.com/>
- [18] *W3Schools Online Web Tutorials* [online]. c1999-2019 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: www.w3schools.com/js/default.asp
- [19] *Wikipedia otevřená encyklopedie* [online]. c2019 [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://www.wikipedia.org/>



Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
AC	Alternating current
AJAX	Asynchronous JavaScript and XML
DC	Direct current
ES6	ECMAScript 6
GEEC	Graphic editor of electrical circuits
HDL	Hardware Description Languages
HTML	HyperText Markup Language
JPEG	Joint Photographic Experts Group
MathML	Mathematical Markup Language
OP	Operating point
OPUS	OPTimalization UtilitieS
PDF	Portable Document Format
PHP	Personal Home Page
PNG	Portable Network Graphics
PraCAN	Prague Circuit Analyser
PZ	Pole-Zero
SQL	Structured Query Language
SPICE	Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis
TF	Transfer function
UIC	Use initial conditions