

Modelování dynamických dějů v elektronických obvodech pomocí prostředí Mathematica

Simulation of dynamic processes in electronic circuits
using Mathematica environment

Martin Jašek

Bakalářská práce
2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin JAŠEK**
Studijní program: **B 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**

Téma práce: **Modelování dynamických dějů v elektronických obvodech pomocí prostředí Mathematica**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši zaměřenou na dané téma.
2. V prostředí Mathematica vytvořte balík programů pro simulaci chování základních elektronických obvodů.
3. Simulace provedte pomocí příkazů Manipulate.
4. Podrobně popište vytvořený podpůrný kód.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. DOLEČEK, Jaroslav. Moderní učebnice elektroniky – 1. díl . 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005. 338 s. ISBN 80-7300-146-2.
2. DOLEČEK, Jaroslav. Moderní učebnice elektroniky – 4. díl . 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2006. 296 s. ISBN 80-7300-185-3.
3. KESL, Jan. Elektronika I. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2003. 120 s. ISBN 80-7300-074-1.
4. MALINA, Václav. Poznáváme elektroniku II. 2. vyd. České Budějovice: KOPP, 2008. 193 s. ISBN 978-80-7232-344-9.
5. MAŤÁTKO, Jan. Elektronika. 6. vyd. Praha: Idea servis, 2008. 362 s. ISBN 978-80-85970-64-7.
6. UHLÍŘ, Ivan. Elektrické obvody a elektronika. 2. vyd. Praha: ČVUT, 2008. 158 s. ISBN 978-80-01-03932-8.
7. CHRAMCOV, Bronislav. Základy práce v prostředí Mathematica. 2. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2006. 122 s. ISBN 80-7318-510-5.
8. Wolfram Mathematica7 Documentation center. URL:
<http://reference.wolfram.com/mathematica/guide/Mathematica.html>

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Ivan Zelinka, Ph.D.

Ústav informatiky a umělé inteligence

Datum zadání bakalářské práce:

19. února 2010

Termín odevzdání bakalářské práce:

19. května 2010

Ve Zlíně dne 19. února 2010

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

děkan



doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.

ředitel ústavu

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na nový způsob modelování dynamických dějů v elektronických obvodech. Rozdělena na teoretickou část, zahrnující literární rešerši, a praktickou část, popisující vytvořený software.

První kapitola pojednává o vybraných elektronických obvodech, jejich základních vlastnostech a použití. Druhá kapitola obsahuje úvod do prostředí Wolfram Mathematica, v němž jsem vytvořený software naprogramoval. Ve třetí kapitole nalezneme stávající metody modelování, odlehčené i profesionální. Čtvrtá kapitola, nacházející se již v praktické části, seznamuje s novým řešením a vytvořeným software. Pátá kapitola se zabývá ovládním a vizualizací tohoto software. Šestá kapitola zkoumá podrobněji jeho zdrojový kód.

Klíčová slova: Mathematica, Manipulate, RLC, elektronické obvody, dynamické děje.

ABSTRACT

This bachelor thesis is specialized on a new way of simulation of dynamic processes in electronic circuits. It is divided into a theoretical part, with a literature retrieval, and a practical part, with a description of the created software.

The first chapter deals with chosen electronic circuits, their basic features and application. The second chapter contains an introduction to the Mathematica environment, where I has been programming the created software. In the third chapter we can find existing methods of simulation, single and also professional. The fourth chapter, now in the practical part, introduces with the new solution and created software. The fifth chapter is concerned with a source code in more detail.

Keywords: Mathematica, Manipulate, RLC, electronic circuits, dynamic processes.

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce, doc. Ing. Ivanu Zelinkovi, Ph.D., za ochotu se mi věnovat a pomoci mi cennými radami a připomínkami během vypracovávání.

Prohlašuji, že

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

Prohlašuji,

že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 VYBRANÉ ELEKTRONICKÉ OBVODY	11
1.1 ZÁKLADNÍ SOUČÁSTKY	11
1.1.1 Rezistor	11
1.1.2 Cívka	12
1.1.3 Kondenzátor	13
1.2 SÉRIOVÁ ZAPOJENÍ	14
1.2.1 Zapojení rezistoru, cívky a kondenzátoru	14
1.2.2 Zapojení rezistoru a cívky	15
1.2.3 Zapojení rezistoru a kondenzátoru	16
1.3 PARALELNÍ ZAPOJENÍ	17
1.3.1 Zapojení rezistoru, cívky a kondenzátoru	17
1.3.2 Zapojení rezistoru a cívky	19
1.3.3 Zapojení rezistoru a kondenzátoru	19
1.4 HYBRIDNÍ ZAPOJENÍ	20
1.5 MŮSTKOVÁ ZAPOJENÍ.....	21
1.5.1 Integrační články	21
1.5.2 Derivační články	22
1.5.3 Wienův článek.....	23
1.5.4 Přemostěný T-článek.....	23
1.5.5 Souměrný dvojitý T-článek.....	24
2 WOLFRAM MATHEMATICA	25
2.1 ÚVOD DO PROSTŘEDÍ MATHEMATICA	25
3 MODELOVÁNÍ DYNAMICKÝCH DĚJŮ	27
3.1 DYNAMICKÉ DĚJE.....	27
3.2 DOSAVADNÍ METODY MODELOVÁNÍ.....	27
3.2.1 Circuit Simulator	27
3.2.2 Edison.....	28
3.2.3 OrCAD	28
II PRAKTICKÁ ČÁST	30
4 MODELOVÁNÍ DYNAMICKÝCH DĚJŮ	31
4.1 VLASTNÍ ŘEŠENÍ MODELOVÁNÍ.....	31
4.2 VYTVOŘENÉ PROGRAMY	31
4.2.1 Sériová zapojení	31
4.2.2 Paralelní zapojení	32
4.2.3 Hybridní zapojení.....	32
4.2.4 Můstková zapojení	33
5 VIZUALIZACE PROGRAMŮ	34
5.1 SÉRIOVÁ ZAPOJENÍ	35
5.1.1 Postranní panel s ovládacími prvky	35
5.1.2 Vizualizační okno sériového zapojení R-L-C	35
5.1.3 Vizualizační okno sériového zapojení R-L	36

5.2	HYBRIDNÍ ZAPOJENÍ	37
5.2.1	Postranní panel s ovládacími prvky	37
5.2.2	Vizualizační okno hybridního zapojení R-L R-C	38
6	ZDROJOVÝ KÓD PROGRAMŮ	39
6.1	SÉRIOVÁ ZAPOJENÍ	39
6.1.1	Sdílený zdrojový kód	39
6.1.2	Zdrojový kód pro sériové zapojení R-L-C	40
6.1.3	Zdrojový kód pro sériové zapojení R-L	42
6.1.4	Zdrojový kód s příkazem Manipulate	45
6.2	HYBRIDNÍ ZAPOJENÍ	47
6.2.1	Zdrojový kód pro hybridní zapojení R-L R-C	47
	ZÁVĚR	48
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....	49
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	50
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	51
	SEZNAM OBRÁZKŮ	52
	SEZNAM PŘÍLOH.....	54

ÚVOD

Softwarů určených pro simulaci elektronických obvodů a modelování v nich probíhajících dějů můžeme v dnešní době nalézt vícero. Od jednoduchých až po propracované, freeware i placené. Cílem této práce je nabídnout alternativu k těmto řešením v podobě software, který se specializuje na hlubší zkoumání vybraných RLC obvodů, a zároveň tak poukázat na schopnosti prostředí Mathematica.

Osnova byla sestavena tak, aby teoretická část krátce pokryla disciplíny, kterých se téma práce dotýká, a praktická část hlouběji přiblížila vytvořený software.

První kapitola pojednává o vybraných elektronických obvodech, jejich základních vlastnostech a použití. Elektronika je široká oblast, která se zkoumá z velké části matematickými operacemi a vzorci. Vzhledem k cíli a omezenému rozsahu této práce se kapitola dotýká problematiky jen okrajově. Druhá kapitola obsahuje stručný úvod do prostředí Wolfram Mathematica, v němž byl vytvořený software naprogramován. Nerozebírá podrobně způsoby práce, jelikož tomuto se cíleně věnuje jiná literatura. Ve třetí kapitole nalezneme ukázkou stávajících metod modelování, jejich stručnou charakteristiku. Opět není předmětem této práce studovat dosavadní aplikace důkladněji. Čtvrtá kapitola, nacházející se již v praktické části, seznamuje s novým řešením a vytvořeným software. Zmiňuje, která elektronická zapojení lze simulovat a jaké děje modelovat. Pátá kapitola se zabývá ovládáním a vizualizací tohoto software. Demonstruje uživatelské grafické rozhraní a také implementované funkce. Šestá kapitola zkoumá podrobněji zdrojový kód, k jakému účelu slouží jednotlivé části.


I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VYBRANÉ ELEKTRONICKÉ OBVODY

Tato kapitola ve stručnosti uvádí zkoumané elektronické obvody. Studium probíhá pouze z pohledu obvodu střídavého proudu. Opírá se o poznatky z [1], [2], [4], [5].

1.1 Základní součástky

1.1.1 Rezistor

Rezistor (označován R , schématická značka ) je elektronická součástka, která klade procházejícímu proudu odpor o dané velikosti. Vzniká na něm úbytek napětí. Odpor rezistoru je dán konstrukcí a lze jej spočítat vzorcem (1) znalostí materiálové konstanty ρ , délky l a průřezu S použitého materiálu.

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad [\Omega] \quad (1)$$

Dále se nabízí Ohmův zákon (2), kterým lze odpor rezistoru rovněž spočítat, známe-li hodnotu procházejícího proudu I a přiloženého napětí U .

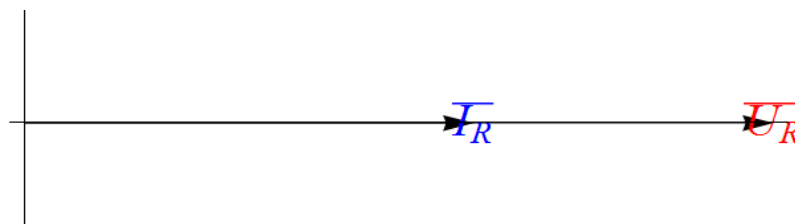
$$R = \frac{U}{I} \quad [\Omega] \quad (2)$$

Zapojíme-li více rezistorů do série, výsledná hodnota odporu bude dána součtem odporů dílčích (3). Při paralelním zapojení je převrácená hodnota výsledného odporu rovna součtu převrácených hodnot dílčích odporů (4).

$$R_S = R_1 + R_2 \quad [\Omega] \quad (3)$$


$$\frac{1}{R_P} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad [\Omega] \quad (4)$$

V obvodu střídavého proudu nedochází na rezistoru k fázovému posuvu (obr.1.).



Obr. 1. Fázorový diagram rezistoru.

1.1.2 Cívka

Cívka (označována L , schématická značka ) je elektronická součástka, jejíž základní vlastností je indukčnost, tzn. schopnost přeměny elektrické energie na energii magnetického pole. Indukčnost cívky lze spočítat (5), známe-li hodnotu magnetického indukčního toku Φ a procházejícího proudu I .

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad [H] \quad (5)$$

Zapojíme-li více cívek do série, bude výsledná hodnota indukčnosti dána součtem indukčností dílčích (6). Při paralelním zapojení je převrácená hodnota výsledné indukčnosti rovna součtu převrácených hodnot dílčích indukčností (7).

$$L_S = L_1 + L_2 \quad [H] \quad (6)$$

$$\frac{1}{L_P} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} \quad [H] \quad (7)$$

V obvodu střídavého proudu se cívka chová jako zdánlivý odpor a proud se opožďuje za napětím (obr.2.). V ideálním případě je fázový posun $\pi/2$, v reálné cívce bude tato hodnota odlišná vlivem působení činného odporu vinutí.



Obr. 2. Fázorový diagram ideální cívky.

Na cívce vzniká reaktance X_L závislá na kmitočtu f a indukčnosti L . Spolu s odporem vinutí cívky R_L tvoří reaktance v komplexní rovině zdánlivý odpor Z (8).

$$\bar{Z} = R_L + jX_L = R_L + j2\pi fL \quad [\Omega] \quad (8)$$

1.1.3 Kondenzátor

Kondenzátor (označován C , schématická značka \parallel) je elektronická součástka, jejíž základní vlastností je kapacita, tzn. schopnost dočasně uchovat elektrický náboj. Kapacitu kondenzátoru lze spočítat (9), známe-li hodnotu elektrického náboje Q a napětí U .

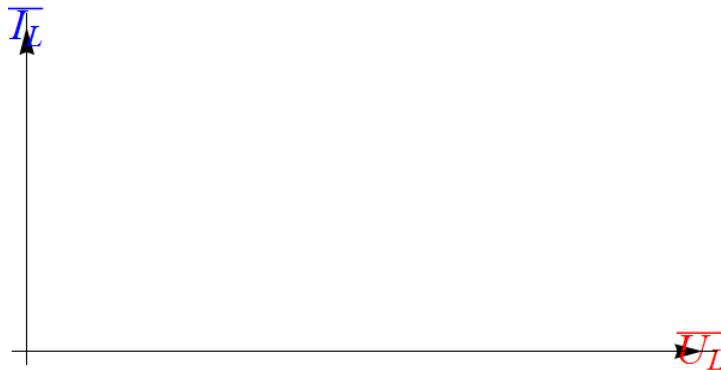
$$C = \frac{Q}{U} \quad [F] \quad (9)$$

Zapojíme-li více kondenzátorů do série, bude převrácená hodnota výsledné kapacity rovna součtu převrácených hodnot dílčích kapacit (10). Při sériovém zapojení je výsledná hodnota kapacity dána součtem kapacit dílčích (11).

$$\frac{1}{C_S} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad [F] \quad (10)$$

$$C_P = C_1 + C_2 \quad [F] \quad (11)$$

V obvodu střídavého proudu se kondenzátor chová jako zdánlivý odpor a proud předbíhá napětí (obr.3.). V ideálním případě je fázový posun $\pi/2$, v reálném kondenzátoru bude tato hodnota odlišná vlivem působení činného odporu elektrod a dielektrika.



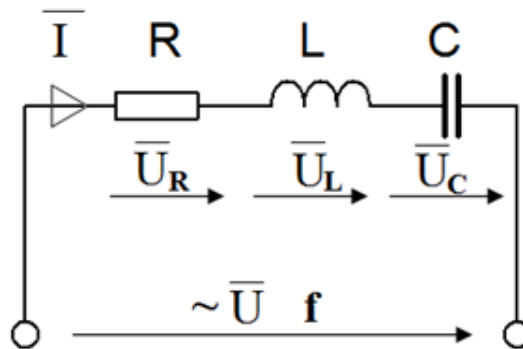
Obr. 3. Fázorový diagram ideálního kondenzátoru.

Na kondenzátoru vzniká reaktance X_C závislá na kmitočtu f a kapacitě C . Spolu s odporem elektrod kondenzátoru R_C tvoří reaktance v komplexní rovině zdánlivý odpor Z (8).

$$\bar{Z} = R_C + jX_C = R_C - j \frac{1}{2\pi f C} \quad [\Omega] \quad (12)$$

1.2 Sériová zapojení

V sériovém obvodu (obr.4.) teče všemi zapojenými prvky stejný proud I . Na součástkách se objeví úbytek napětí, jejichž součtem získáme napětí napájecí U . Nelze však sčítat přímo, jelikož v obvodu dochází vlivem zapojení cívky nebo kondenzátoru k fázovému posunu. Matematické operace je tak nutno provádět v komplexní rovině.



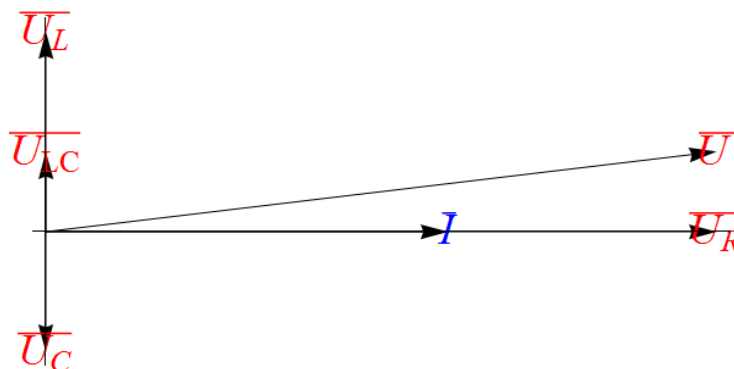
Obr. 4. Schéma sériového zapojení R-L-C.

Sériové rezonanční obvody mají poměrně široké využití, a to hlavně pro svoji rezonanční (frekvenční) charakteristiku. Nejčastěji se používají jako kmitočtové filtry.

1.2.1 Zapojení rezistoru, cívky a kondenzátoru

V tomto zapojení na obvod působí účinky cívky a kondenzátoru současně (obr.5.). Napětí na cívce předbíhá proud, který je ve fázi s napětím na rezistoru. Napětí na kondenzátoru se za proudem opožďuje. Obvod je kmitočtově závislý, což dokazuje vzorec (13) pro výpočet celkové impedance (zdánlivého odporu) obvodu. Výsledná reaktance X je při vysokých kmitočtech kladná, při nízkých kmitočtech záporná.

$$\bar{Z} = R + j(X_L - X_C) \quad [\Omega] \quad (13)$$



Obr. 5. Fázorový diagram sériového obvodu R-L-C.

Z hlediska účinků cívky a kondenzátoru mohou nastat tři děje (uvádí také [1]):

a) $X_L < X_C$

Obvod má kapacitní charakter, chová se jako kondenzátor v sérii s rezistorem.

b) $X_L > X_C$

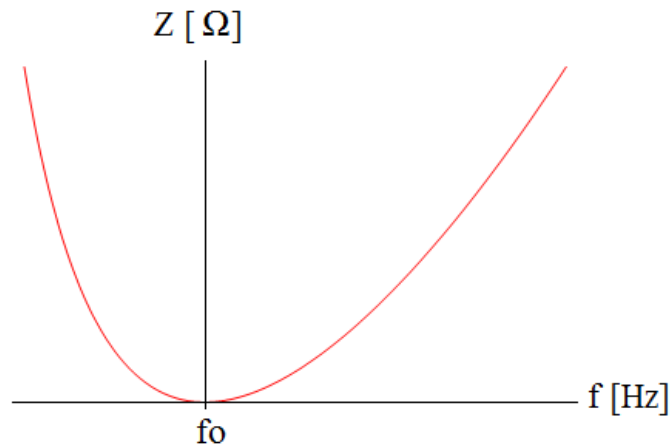
Obvod má indukční charakter, chová se jako cívka v sérii s rezistorem.

c) $X_L = X_C$

Účinky kondenzátoru a cívky se navzájem ruší, obvod vykazuje pouze činný odpor.

Fázový posun je nulový, nastává tzv. rezonance.

Rezonance probíhá při rezonanční frekvenci f_0 . Hodnota impedance obvodu klesne na nejnižší hodnotu, což je patrné z rezonanční křivky (obr.6.)



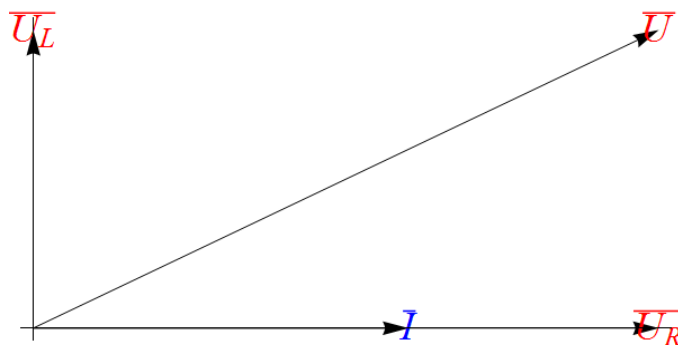
Obr. 6. Rezonanční křivka sériového obvodu R-L-C.

1.2.2 Zapojení rezistoru a cívky

Zapojíme-li pouze rezistor a cívku, výsledné napětí bude vždy předbíhat proud (obr.7.).

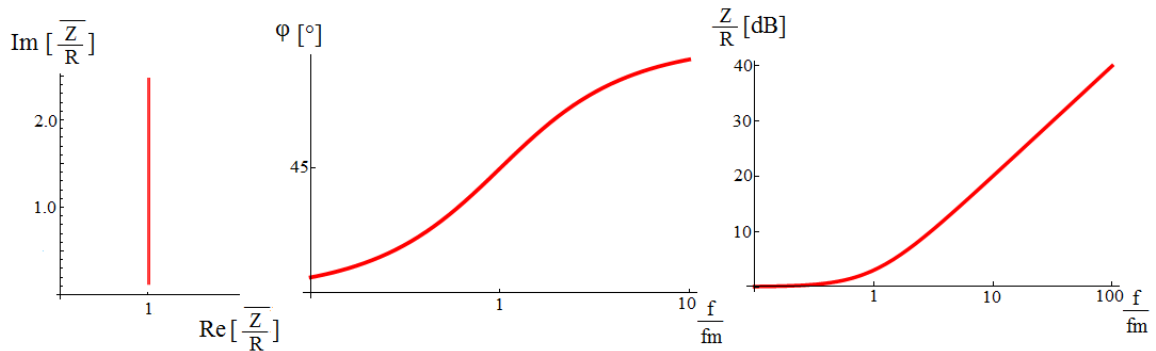
Celkovou impedanci lze vypočítat pomocí vzorce (14).

$$\bar{Z} = R + jX_L \quad [\Omega] \quad (14)$$



Obr. 7. Fázorový diagram sériového obvodu R-L.

V praxi se kromě znalosti impedance obvodu pracuje také s frekvenčními závislostmi vyjádřenými pomocí příslušných charakteristik (obr.8.). Nejčastěji se zde setkáváme s poměrnými hodnotami, tzn. frekvenci f srovnáváme s mezní frekvencí f_m a impedanci Z srovnáváme s činným odporem R . Zpravidla se využívá logaritmických stupnic, popř. vyjadřování v decibelech. Při frekvenci, kterou nazýváme mezní, dochází k rovnosti hodnot reaktance X_L a činného odporu R .

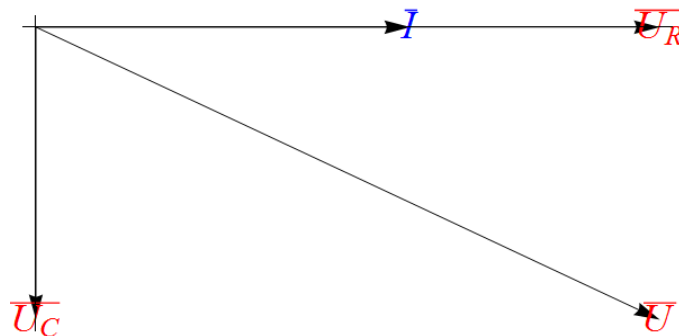


Obr. 8. Charakteristiky sériového obvodu $R-L$ – fázorová, fázová, frekvenční amplitudová.

1.2.3 Zapojení rezistoru a kondenzátoru

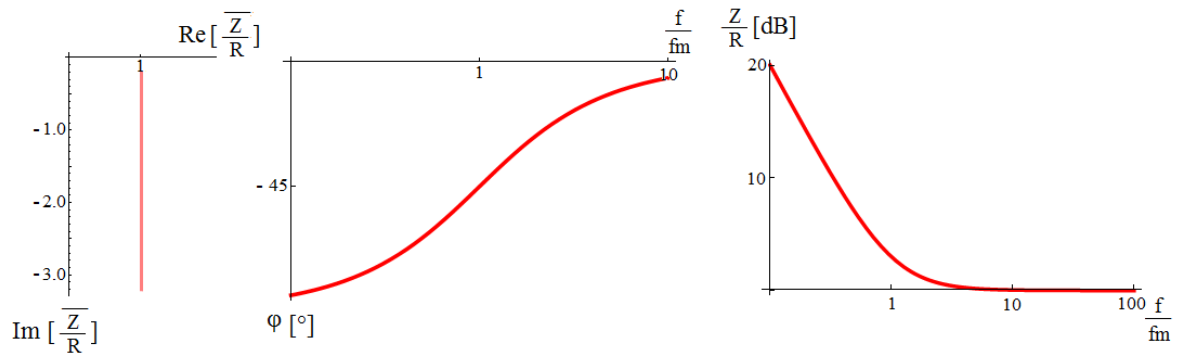
Zapojíme-li pouze rezistor a kondenzátor, výsledné napětí bude vždy předbíhat proud (obr.7.). Celkovou impedanci lze vypočítat pomocí vzorce (15).

$$\bar{Z} = R - jX_C \quad [\Omega] \quad (15)$$



Obr. 9. Fázorový diagram sériového obvodu $R-C$.

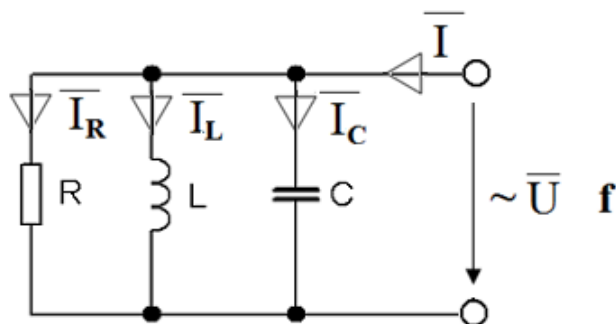
Vlastnosti tohoto zapojení nám opět vyobrazují charakteristiky (obr.10.), jenž stejně jako v předchozím zapojení využívají poměrných hodnot a na některých osách logaritmickou stupnici. Fázorová charakteristika vyobrazuje závislost imaginární složky poměrné impedance na reálné složce, fázová charakteristika závislost fázového posunu na poměrné frekvenci a frekvenční amplitudová charakteristika vyjadřuje závislost poměrné impedance v decibelech na poměrné frekvenci.



Obr. 10. Charakteristiky sériového obvodu R-C – fázorová, fázová, frekvenční amplitudová.

1.3 Paralelní zapojení

V paralelním obvodu (obr.11.) naměříme na každém zapojeném prvku stejné napětí U . Větve však potečou různé proudy, jejichž součtem získáme celkový proud I . Opět však nelze sčítat přímo, jelikož v obvodu dochází vlivem zapojení cívky nebo kondenzátoru k fázovému posunu. Matematické operace je tak nutno provádět v komplexní rovině.



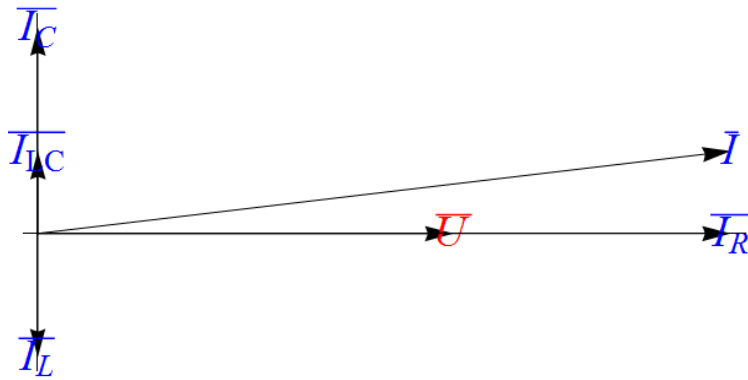
Obr. 11. Schéma paralelního zapojení RLC.

Paralelní rezonanční obvody se využívají ve funkci pásmové propusti ve VF zesilovačích a jako oscilační člen ve VF oscilátorech.

1.3.1 Zapojení rezistoru, cívky a kondenzátoru

Na tento obvod působí účinky cívky a kondenzátoru současně (obr.12.). Proud v kondenzátoru předbíhá napětí, které je ve fázi s proudem tekoucím rezistorem. Proud cívkou se za napětím opožďuje. Obvod je kmitočtově závislý, což dokazuje vzorec (16) pro výpočet celkové impedance (zdánlivého odporu) obvodu. Výsledná reaktance X je při vysokých kmitočtech záporná, při nízkých kmitočtech kladná.

$$\frac{1}{\bar{Z}} = \frac{1}{R} + j\left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C}\right) \quad [\Omega] \quad (16)$$

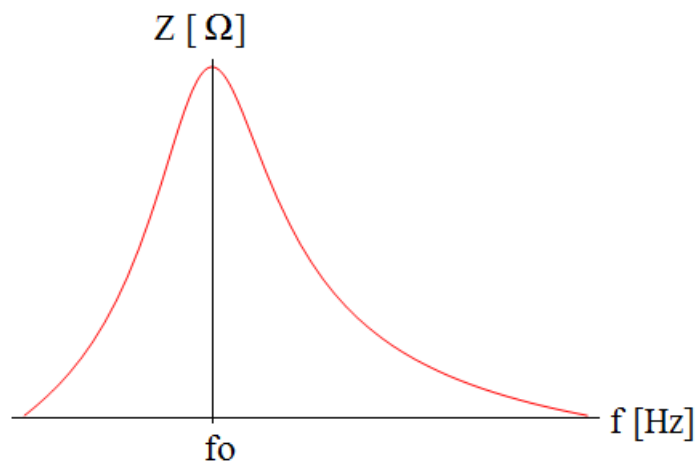


Obr. 12. Fázorový diagram paralelního obvodu RC.

Z hlediska účinků cívky a kondenzátoru mohou nastat tři děje (uvádí také [1]):

- a) $X_L < X_C$
Obvod má indukční charakter, chová se jako cívka paralelně s rezistorem.
- b) $X_L > X_C$
Obvod má kapacitní charakter, chová se jako kondenzátor paralelně s rezistorem.
- c) $X_L = X_C$
Účinky kondenzátoru a cívky se navzájem ruší, obvod vykazuje pouze činný odpor.
Fázový posun je nulový, nastává tzv. rezonance.

Rezonance probíhá při rezonanční frekvenci f_0 . Hodnota impedance obvodu vzroste na maximální hodnotu, což je patrné z rezonanční křivky (obr.13.)

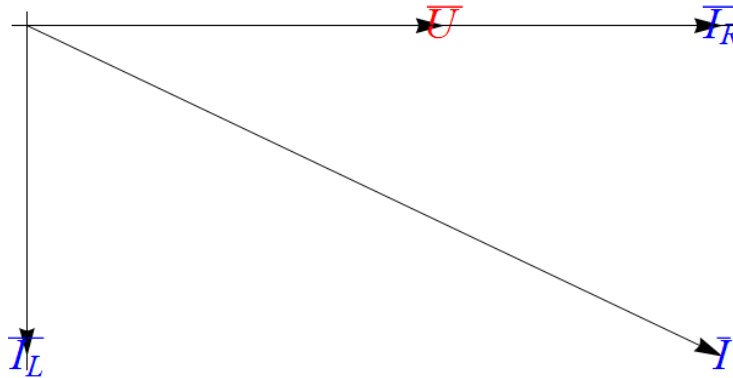


Obr. 13. Rezonanční křivka paralelního obvodu RLC.

1.3.2 Zapojení rezistoru a cívky

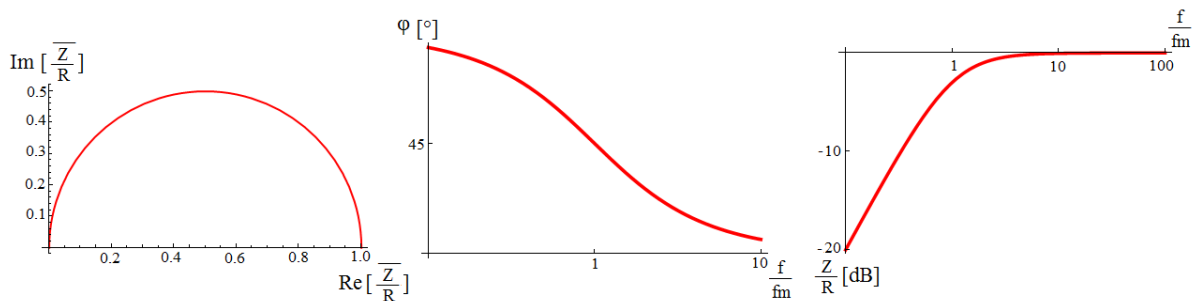
Zapojíme-li pouze rezistor a cívku, výsledný proud bude vždy opožděný za napětím zdroje (obr.14.). Celkovou impedanci lze vypočítat pomocí vzorce (17).

$$\frac{1}{\bar{Z}} = \frac{1}{R} + j \frac{1}{X_L} \quad [\Omega] \quad (17)$$



Obr. 14. Fázorový diagram paralelního obvodu RL.

Rovněž u paralelních zapojení nalezneme fázorovou, fázovou a frekvenční amplitudovou charakteristiku (obr.15.).

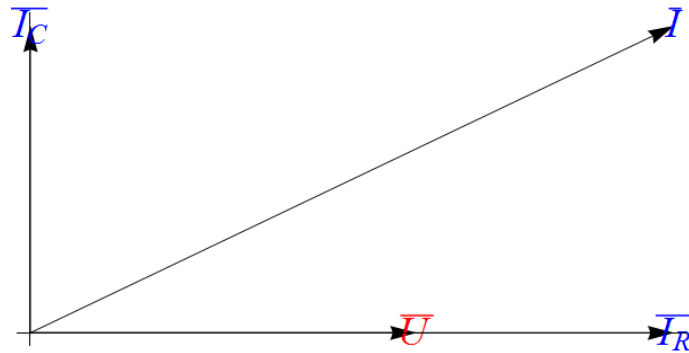


Obr. 15. Charakteristiky paralelního obvodu RL – fázorová, fázová, frekvenční amplitudová.

1.3.3 Zapojení rezistoru a kondenzátoru

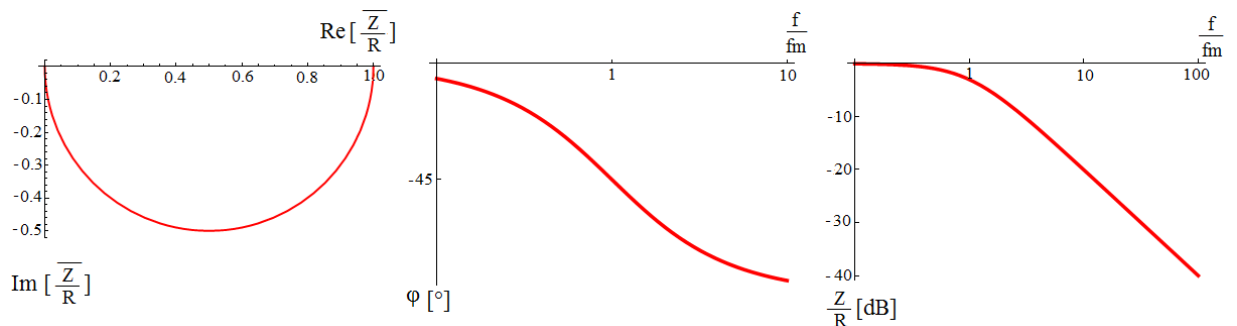
Zapojíme-li pouze rezistor a kondenzátor, výsledný proud bude vždy předbíhat napětí zdroje (obr.16.). Celkovou impedanci lze vypočítat pomocí vzorce (18).

$$\frac{1}{\bar{Z}} = \frac{1}{R} - j \frac{1}{X_C} \quad [\Omega] \quad (18)$$



Obr. 16. Fázorový diagram paralelního obvodu RC.

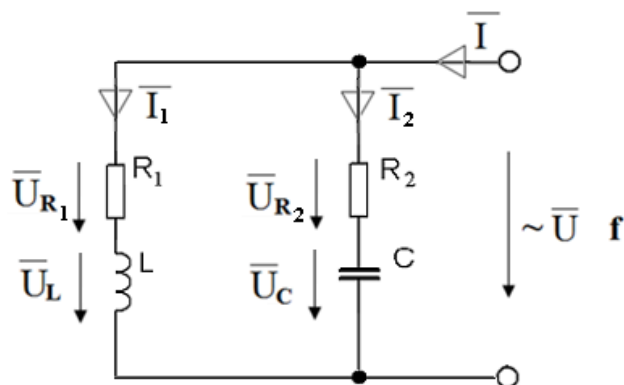
Určující charakteristiky tohoto obvodu viz obrázek (obr.17.).



Obr. 17. Charakteristiky paralelního obvodu RC – fázorová, fázová, frekvenční amplitudová.

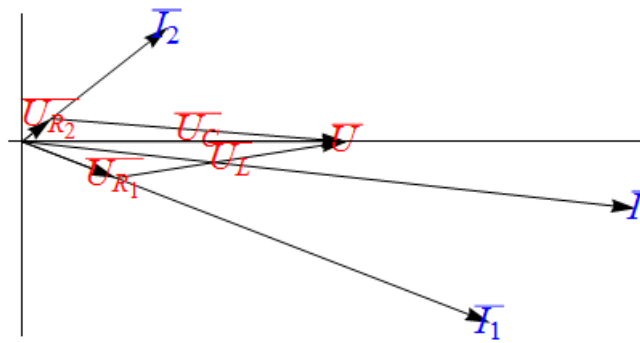
1.4 Hybridní zapojení

Hybridní zapojení vzniknou kombinací předchozích typů zapojení. Jednou z variant je paralelní spojení sériových obvodů (obr.18.).



Obr. 18. Schéma hybridního zapojení.

Fázorový diagram (obr.19.) ukázkového obvodu zohledňuje součty napětí v sériových zapojeních i součty proudů paralelního zapojení.



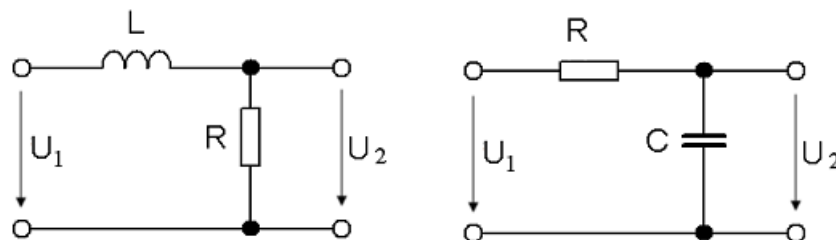
Obr. 19. Fázorový diagram hybridního zapojení.

1.5 Můstková zapojení

Můstková zapojení patří mezi komplexní dvojbrany (mají dvě vstupní a dvě výstupní svorky). Používají se pro zpracování vstupního signálu, např. zesílení nebo kmitočtovou úpravu, v oscilátorech, televizní a VF technice.

1.5.1 Integrační články

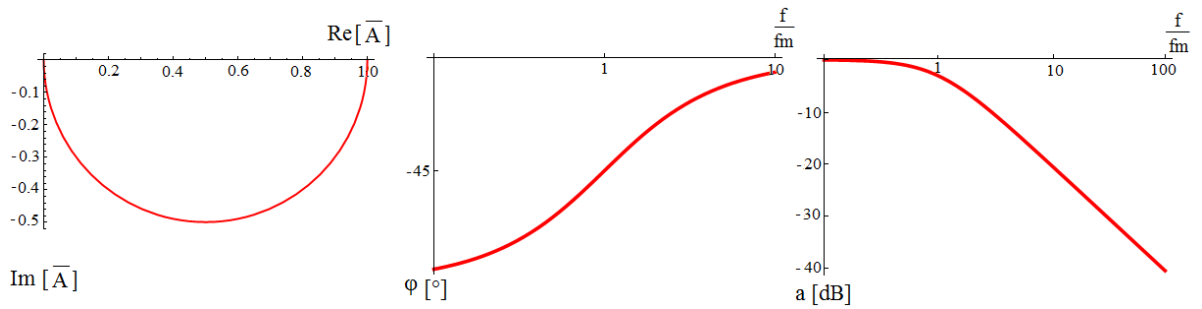
Integrační články (obr.20.) fungují jako dolní propust', tzn. nízké kmitočty propouští, vysoké potlačuje. Výstupní napětí je úměrné integrálu vstupního napětí. Zapojení s kondenzátorem se používá také ve funkci RC filtru pro filtraci usměrněného napětí.



Obr. 20. Schéma zapojení integračních článků.

Přenos integračního článku A je dán vztahem (19). Po úpravách vztahu pro zapojení s cívkou a vztahu pro zapojení s kondenzátorem dojdeme k totožnému vztahu, ve kterém figuruje pouze poměrný kmitočet f/f_m . Závislost důležitých veličin nám vykresluje příslušné charakteristiky (obr.21.).

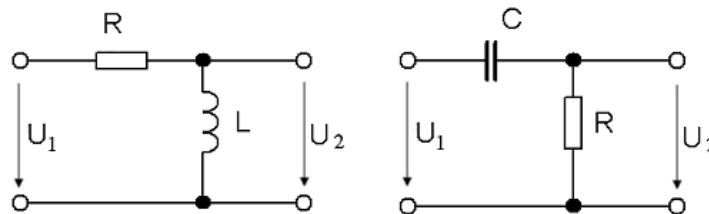
$$\bar{A} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{1+j2\pi f \frac{L}{R}} = \frac{1}{1+j2\pi f CR} = \frac{1}{1+j \frac{f}{f_m}} \quad (19)$$



Obr. 21. Charakteristiky integračních článků – fázorová, fázová, frekvenční amplitudová.

1.5.2 Derivační články

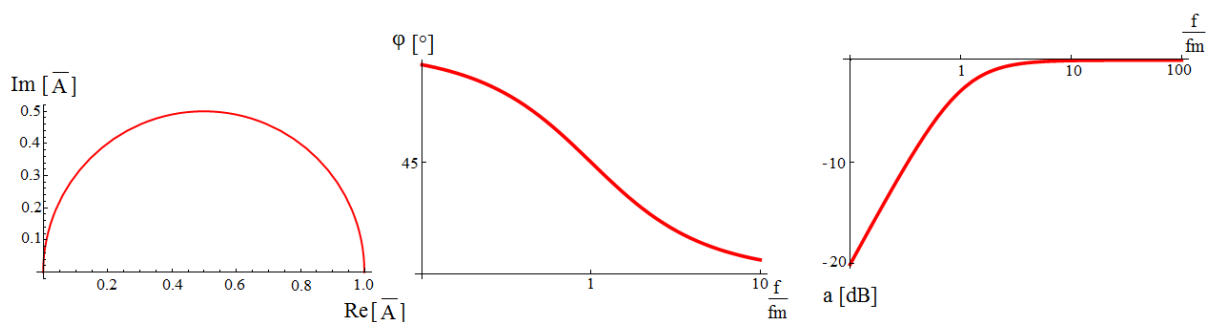
Derivační články (obr.22.) fungují jako horní propust', tzn. vysoké kmitočty propouští, nízké potlačuje. Výstupní napětí je úměrné derivaci vstupního napětí.



Obr. 22. Schéma zapojení derivačních článků.

Přenos derivačního článku A je dán vztahem (20). Po úpravách vztahu pro zapojení s cívkou a vztahu pro zapojení s kondenzátorem dojdeme k totožnému vztahu, ve kterém figuruje pouze poměrný kmitočet f/f_m . Závislost důležitých veličin nám vykreslují příslušné charakteristiky (obr.23.).

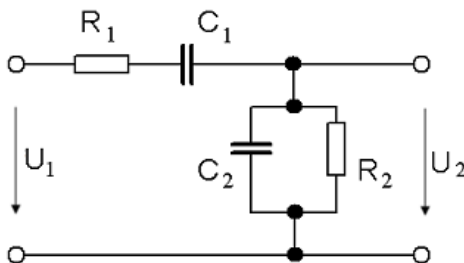
$$\bar{A} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{j2\pi f \frac{L}{R}}{1 + j2\pi f \frac{L}{R}} = \frac{j2\pi f CR}{1 + j2\pi f CR} = \frac{j \frac{f}{f_m}}{1 + j \frac{f}{f_m}} \quad (20)$$



Obr. 23. Charakteristiky derivačních článků – fázorová, fázová, frekvenční amplitudová.

1.5.3 Wienův článek

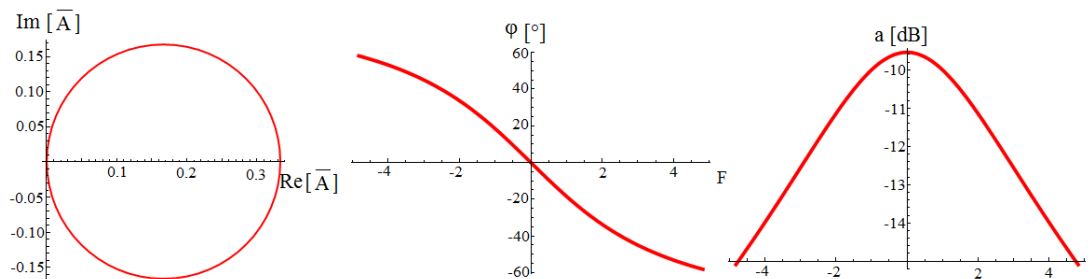
Wienův článek funguje jako pásmová propušť, propouští jen určité pásmo frekvencí. Horní hranici pásma určuje paralelní zapojení R_2C_2 , dolní hranici určuje sériové zapojení R_1C_1 .



Obr. 24. Schéma zapojení Wienova článku.

Pro snadnější zobrazení vlastností tohoto obvodu pomocí charakteristik (obr.25.) používáme poměrné rozladění F (21). Pokud poměrné rozladění vykazuje nulovou hodnotu, dochází k potlačení komplexního účinku kondenzátorů a fázový posun je tak rovněž nulový. K tomuto ději dochází při kritickém kmitočtu f_0 .

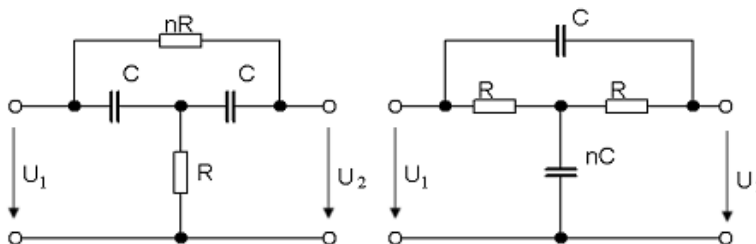
$$F = \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \quad (21)$$



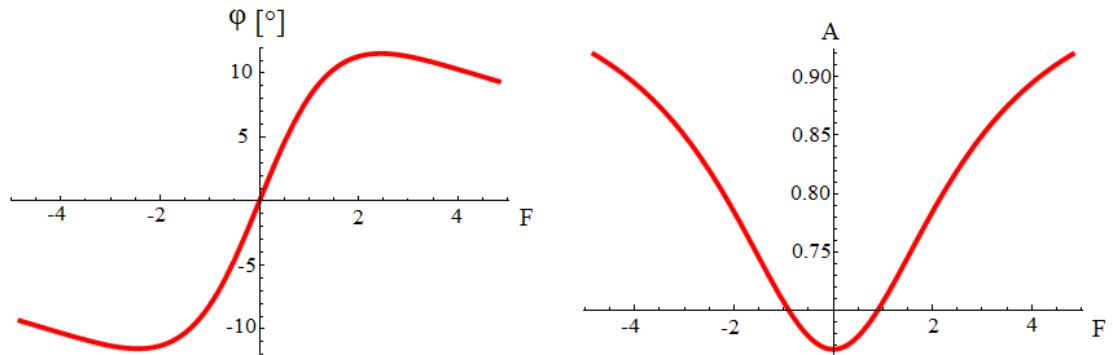
Obr. 25. Charakteristiky Wienova článku – fázorová, fázová, útlumová.

1.5.4 Přemostěný T-článek

Přemostěný T-článek (obr.26.) pracuje jako pásmová zadrž, nepropouští určité kmitočtové pásmo. Písmeno n značí n -násobek hodnoty již zapojené součástky. S rostoucí hodnotou n roste také zesílení článku A a hodnota fázového posunu φ . V charakteristikách (obr.27.) opět využíváme znalosti poměrného rozladění F .



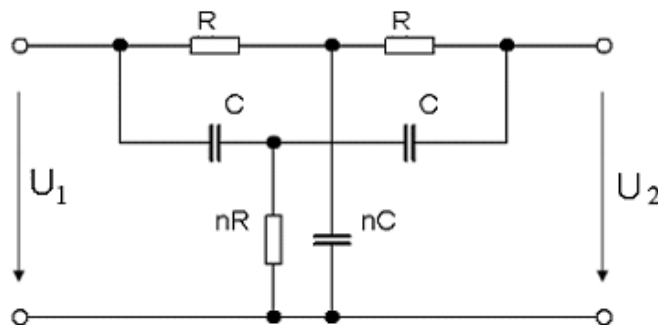
Obr. 26. Schéma zapojení přemostěného T-článku.



Obr. 27. Charakteristiky přemostěného T-článku – fázová, útlumová.

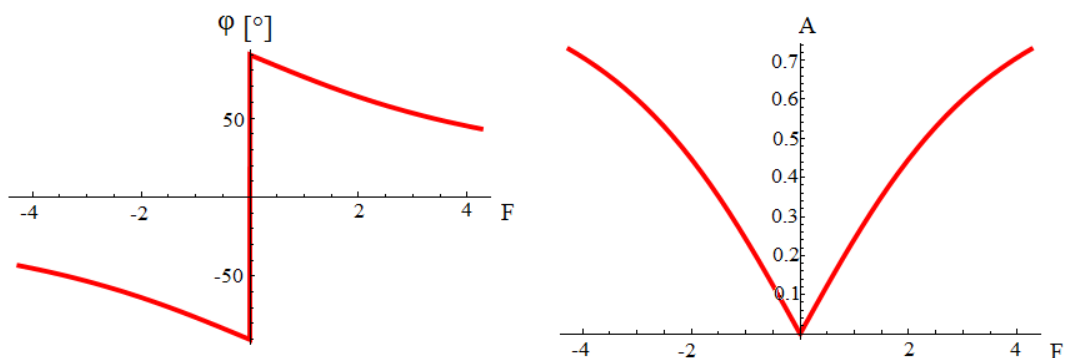
1.5.5 Souměrný dvojitý T-článek

Souměrný dvojitý T-článek (obr.28.) pracuje jako pásmová zadrž, nepropouští určité kmitočtové pásmo. Písmeno n značí n -násobek hodnoty již zapojené součástky. V praxi se volí $n = 0,5$, kdy se při kritické frekvenci zcela potlačuje schopnost zesílení a lze odvodit vztah mezi zesílením A a poměrným rozladěním F .



Obr. 28. Schéma zapojení souměrného dvojitého T-článku.

Závislost fázového posunu φ a zesílení A na poměrném rozladění F můžeme zjistit z fázové a útlumové charakteristiky (obr.29.).

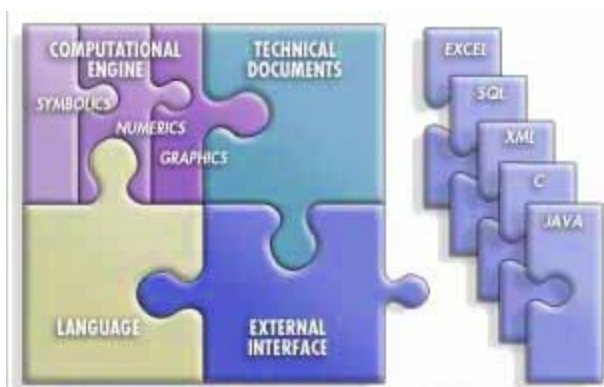


Obr. 29. Charakteristiky souměrného dvojitého T-článku – fázová, útlumová.

2 WOLFRAM MATHEMATICA

2.1 Úvod do prostředí Mathematica

Mathematica je počítačový software společnosti Wolfram Research. Používá vlastní programovací jazyk a integruje nástroje (obr.30.) pro symbolické i numerické výpočty a také grafické nástroje pro vizualizaci výsledků. Dále umožňuje propojení s externími aplikacemi. K dispozici zde máme velmi propracovanou interaktivní technickou dokumentaci, jež podrobně popisuje dostupné funkce a příkazy.

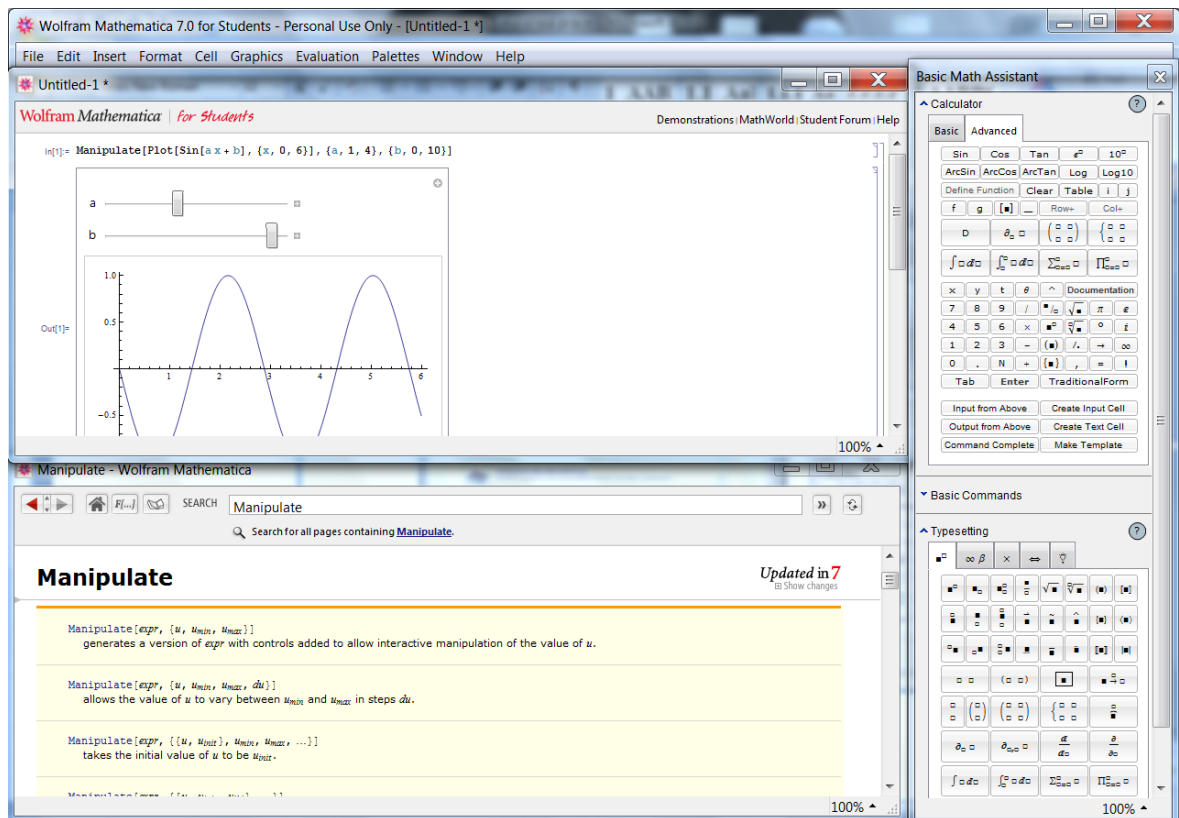


Obr. 30. Integrace nástrojů v Mathematice (z [3]).

Oblast, do níž vepisujeme příkazy, se označuje Notebook. Dělí se do buněk, tzv. Cells, které můžeme pro větší přehlednost sdružovat a také měnit jejich vzhled pomocí přednastavených i vlastních stylů. Výpočet se spouští zvlášť v každé buňce kombinací kláves SHIFT+ENTER, naprogramováním lze realizovat rovněž spuštění více buněk současně.

Mathematica obsahuje palety nástrojů, umožňující grafickým vložením snadnější práci se zlomky, maticemi, integrály, indexy, různými druhy písma apod. Základy programování v tomto prostředí se zabývá podrobně [3], velmi užitečným shledávám i [7].

Jedná se o placený produkt, 15-denní trial verzi lze stáhnout po registraci na internetu (<http://www.wolfram.com/products/mathematica/experience/request.cgi>).



Obr. 31. Wolfram Mathematica 7 for Students.

3 MODELOVÁNÍ DYNAMICKÝCH DĚJŮ

3.1 Dynamické děje

Jedná se o procesy, které se mění v závislosti na vnějších vlivech. Přeneseno na elektronická zapojení- dynamickými ději popisujeme, jak tyto zapojení fungují při změnách frekvence, hodnot zapojených součástek apod. Zpravidla vyjádřeno charakteristikami a diagramy.

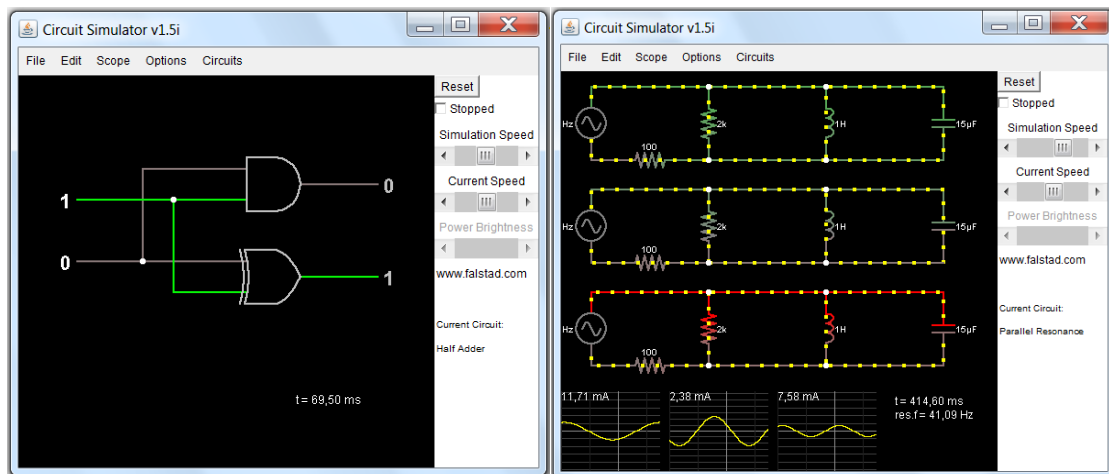
3.2 Dosavadní metody modelování

Tato podkapitola obsahuje stručně uvedený průřez od základní po pokročilejší metodu. Pro hlubší seznámení s dalším software doporučuji [6].

Stávající řešení zpravidla pracují na principu sestavení libovolného obvodu zapojováním dostupných součástek, jež jsou zastoupeny schématickou značkou. Zpravidla nabízí vyobrazení průběhů proudů a napětí a vykreslení libovolných závislostí. Zvláště programy MultiSim a PSpice hodnotím jako velmi mocné nástroje.

3.2.1 Circuit Simulator

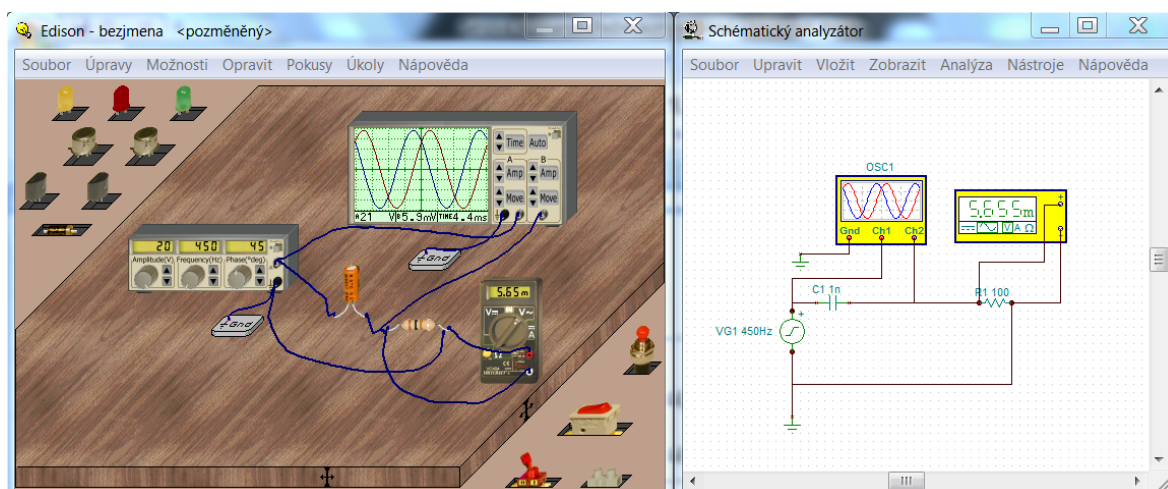
V tomto freeware java appletu, spustitelném přímo v internetovém prohlížeči (<http://falstad.com/circuit/>), můžeme sestavit libovolný obvod pomocí obsáhlé nabídky ideálních součástek nebo využít již zhotovených obvodů. V aplikaci lze rovněž simulovat číslíkové obvody. Schématické značky součástek podle US normy, prostředí v angličtině. Vyobrazují se průběhy napětí a proudů, popř. V-A charakteristika. Ovládání je intuitivní a vizualizace názorná, avšak některé prvky na velmi nízké úrovni.



Obr. 32. Java applet Circuit Simulator.

3.2.2 Edison

Simulační program firmy Terasoft nabízí sestavení libovolného obvodu pomocí velkého množství dostupných součástek s realistickým vzhledem, mezi nimiž nechybí ani osciloskop, multimetr, relé, LED, tranzistory. Paralelně se zapojováním probíhá automatická tvorba schématu zapojení, které lze posléze upravit do přehlednější podoby. Předností tohoto software je rovněž simulace poškození součástek. Zaměřen na výuku žáků škol, z toho důvodu zahrnuje také nepřeborné množství již hotových okomentovaných obvodů a lokalizaci do češtiny.



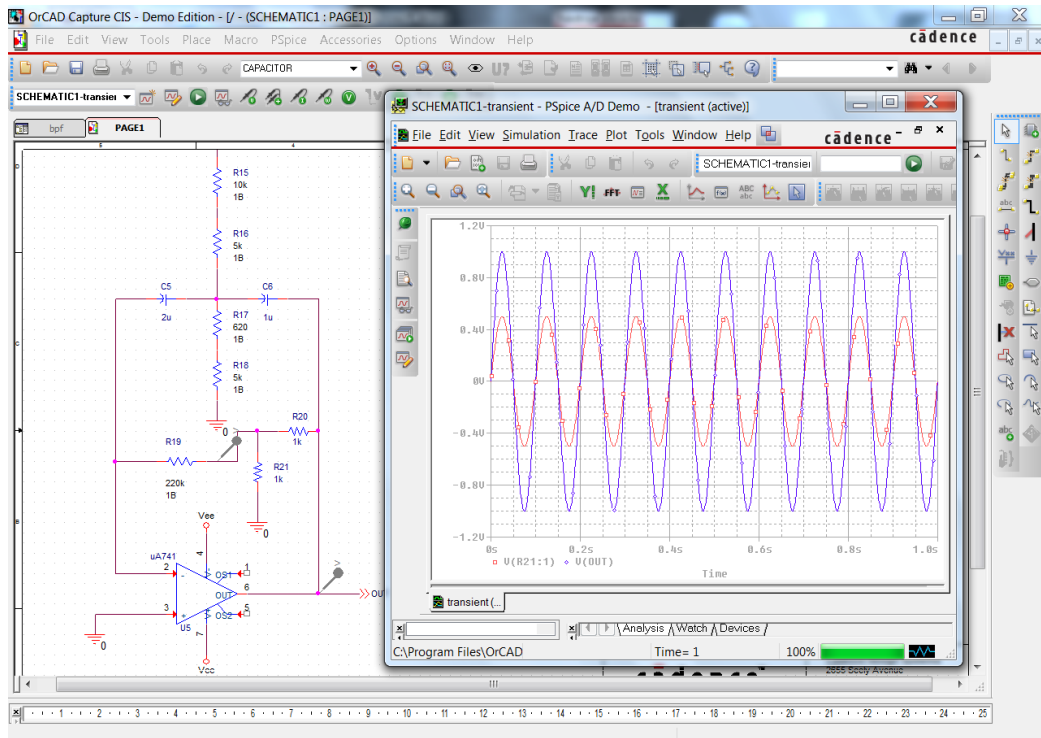
Obr. 33. Simulační software Edison.

Program Edison není zdarma. Funkčně omezená demoverze k dispozici ke stažení na stránkách výrobce (<http://www.terasoft.cz/index1.htm>).

3.2.3 OrCAD

Součástí profesionálního balíku programů OrCAD firmy Cadence jsou mimo jiné i aplikace Orcad Capture a PSpice. Orcad Capture slouží pro sestavení požadovaného obvodu pomocí schématických značek (US norma, v knihovně značek lze vytvořit také podle evropské normy) a vytvoření schématu plošných spojů. Na základě sestaveného obvodu dále PSpice umožňuje vizualizaci navolených veličin. OrCAD patří k velmi propracovaným simulačním programům a není vhodný pro začátečníky- nutné proškolení.

Jedná se o placený software, demoverzi si můžeme vyzkoušet po registraci na webových stránkách výrobce (<http://www.cadence.com/products/orcad/pages/orcaddownloads.aspx>).



Obr. 34. Pohled na aplikace OrCAD Capture a PSpice.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 MODELOVÁNÍ DYNAMICKÝCH DĚJŮ

4.1 Vlastní řešení modelování

Simulování elektronických obvodů v prostředí Mathematica se od předchozích řešení v podkapitole 4.2 liší v několika aspektech.

Nové řešení je zaměřeno výhradně na RLC obvody, které se nesestavují řazením schématických značek součástek. Volí se z předdefinovaných typů obvodů (naprogramovány sériové, paralelní, hybridní a můstkové) a v rámci každého z nich se blíže specifikuje požadované zapojení. Velkou přednost oproti stávajícím aplikacím vidím v integraci vyobrazení fázorových diagramů (u hybridních obvodů můžeme dokonce pro větší přehlednost zvolit, které fázory budou vykresleny), jenž se stejně jako ostatní zařazené charakteristiky mění v reálném čase současně se změnou specifických hodnot součástek pomocí jezdců. Dále bych rád zmínil inovativní doplněk, kterým jsem obohatil charakteristiky jednotlivých obvodů. Jedná se o funkci lokátor určenou pro pokročilejší činnost s pracovním bodem (dále rozvedeno v podpodkapitole 7.1.2).

Vytvořené programy v prostředí Mathematica slouží pro hlubší analýzu vybraných obvodů a jsou tak spíše doplňkem ke stávajícím aplikacím.

4.2 Vytvořené programy

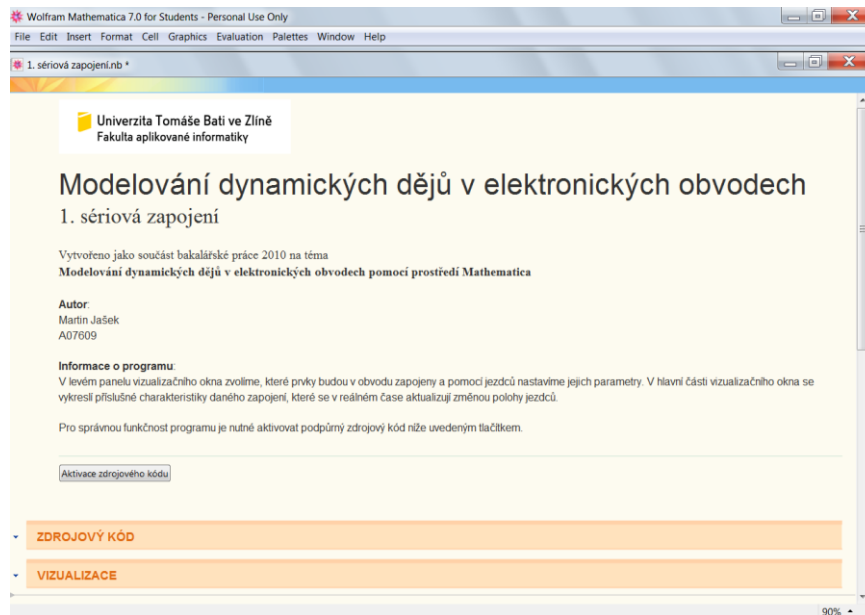
Programy jsem naprogramoval v aplikaci Wolfram Mathematica 7 for Students (studentská licence poskytnutá UTB ve Zlíně), pod touto verzí jsou tudíž optimalizované pro bezproblémový chod.

Každý program se skládá z informativní části a dvou rozbalovacích sekcí pro zpřístupnění zdrojového kódu a samotné vizualizace (obr.35.).

4.2.1 Sériová zapojení

K modelování dynamických dějů v sériových zapojeních slouží program *1.seriova_zapojeni.nb*. Setkáme se zde se zapojeními R-L-C, R-L, R-C, L-C a také se samotnými součástkami R, L, C. Zapojené součástky v obvodu volíme kliknutím do příslušných čtverečků v ovládací části. Vždy můžeme také nastavovat odpor vinutí cívky a odpor elektrod kondenzátoru.

Simulace obvodu R-L-C a L-C obsahuje schéma zapojení, průběh napětí a proudu, rezonanční křivku, fázorový diagram. V simulaci R-L a R-C nalezneme schéma zapojení, průběh napětí a proudu, fázorový diagram, fázorovou charakteristiku, fázovou charakteristiku, frekvenční amplitudovou charakteristiku. Simulace samotných součástek R, L, C nabízí k dispozici schéma zapojení, průběh napětí a proudu, fázorový diagram.



Obr. 35. Ukázkový screenshot z programu *1.seriova_zapojeni.nb*.

4.2.2 Paralelní zapojení

Na paralelní zapojení se zaměřuje program *2.paralelni_zapojeni.nb*. V programu lze modelovat dynamické děje v zapojeních R||L||C, R||L, R||C, L||C a také v samostatných součástkách R, L, C. Zapojené součástky v obvodu volíme kliknutím do příslušných čtverečků v ovládací části. Odpor vinutí cívky a odpor elektrod kondenzátoru lze nastavovat pouze pro názornost v zapojení samotných součástek.

Tento program je obdobný předchozímu a jednotlivá zapojení tak obsahují tytéž vizualizační prvky.

4.2.3 Hybridní zapojení

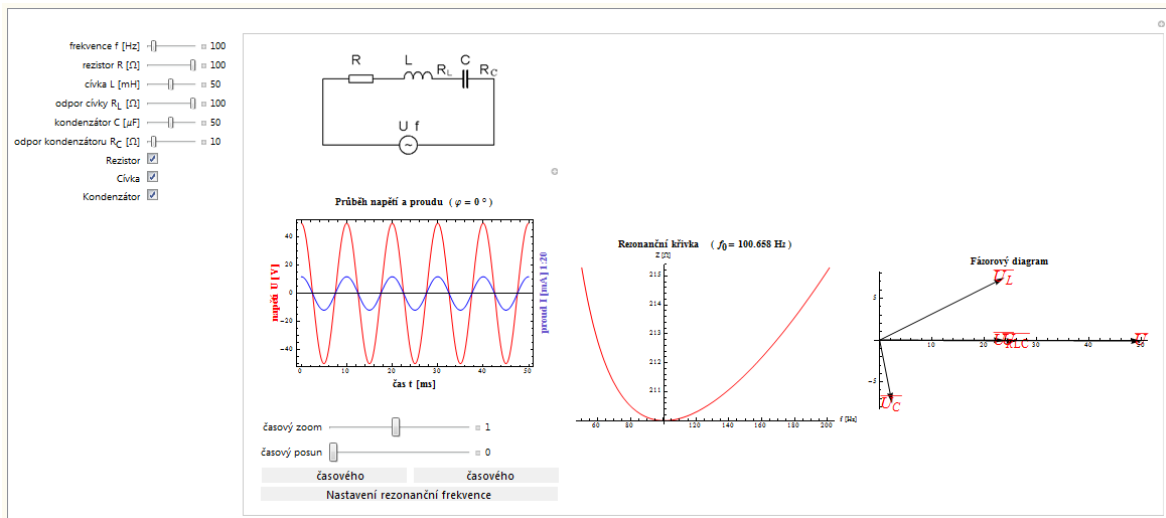
Hybridní obvody můžeme zkoumat programem *3.hybridni_zapojeni.nb*. Program nabízí modelování dynamických dějů v zapojeních R-L||R-L, R-C||R-C, R-L||R-C. Obvod volíme kliknutím na příslušné zástupné tlačítko v ovládací části. Simulace těchto obvodů obsahují schéma zapojení, průběh napětí a proudu, fázorový diagram.

4.2.4 Můstková zapojení

S můstkovými obvody se setkáme v programu *4.mustkova_zapojeni.nb*. Program umožňuje modelovat dynamické děje v integračních člancích (RL, RC, RC s odporovou zátěží), derivačních člancích (RL, RC, RC s kapacitní zátěží), Wien članku, přemostěném T-článku a souměrném dvojitým T-článku. Obvod vybíráme z rozbalovacího menu v ovládací části. Simulace integračních a derivačních článků zahrnují schéma zapojení, fázorovou, fázovou a frekvenční amplitudovou charakteristiku. V simulaci Wien članku nalezneme schéma zapojení, fázorovou, fázovou a útlumovou charakteristiku. Simulace T-článků nabízí schéma zapojení, fázovou a útlumovou charakteristiku.

5 VIZUALIZACE PROGRAMŮ

Modelování dynamických dějů probíhá ve vytvořených programech za pomoci grafického rozhraní (obr.36.). Skládá se z levého postranního panelu sloužícího jako ovládací část a hlavního vizualizačního okna, v němž probíhá samotná vizualizace. Před zahájením modelování je nutné spustit podpůrný kód tlačítkem **Aktivace zdrojového kódu**, které se nachází v informativní části programů (obr.35.).



Obr. 36. Ukázkové grafické rozhraní pro vizualizaci modelování dynamických dějů.

V ovládací části si vybíráme zapojení a nastavujeme parametry zdroje a daných součástek. Vše probíhá v reálném čase, tzn. změna se hned projeví. Ne všechny vyobrazené parametry jsou pro zvolený obvod dostupné, aktivní prvky zjistíme na schématu zapojení v horní části hlavního okna. V postranním panelu nelze nastavit hodnota napětí zdroje, jelikož změna napětí nemá zásadní vliv na vykreslování charakteristik a průběhů. Nicméně dá se upravit podle potřeb ve zdrojovém kódu v sekci Sdílený zdrojový kód (obr.37.).

```

ZDROJOVÝ KÓD
  ■ SDÍLENÝ ZDROJOVÝ KÓD
  L[l_] := l * 10-3;
  c[k_] := k * 10-6;
  U = 50;
  
```

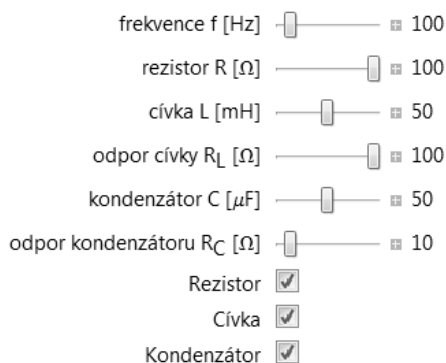
Obr. 37. Změna hodnoty napětí.

Následuje bližší popis selektovaných grafických rozhraní, zbylé pracují obdobně.

5.1 Sériová zapojení

5.1.1 Postranní panel s ovládacími prvky

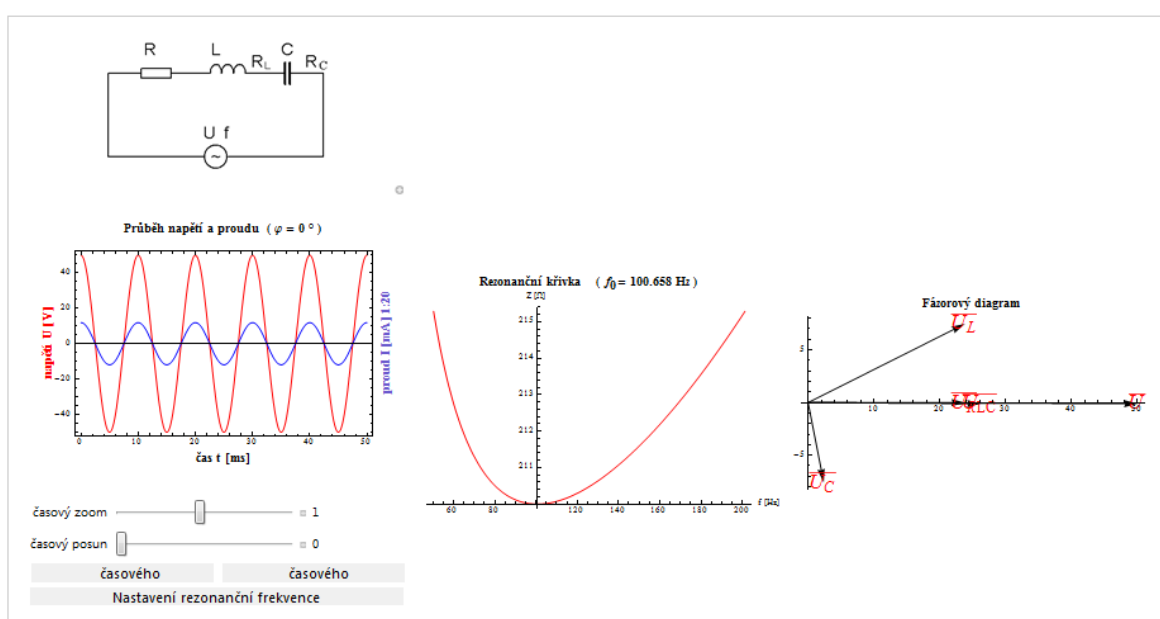
V postranním panelu (obr.38.) se nachází jezdce, kterými posunutím volíme parametry použité ve zvoleném zapojení. Dále kliknutím do čtverečků vybíráme součástky, jež chceme mít zapojeny v obvodu. Každá změna se hned projeví.



Obr. 38. Postranní panel programu
1.seriova_zapojeni.nb.

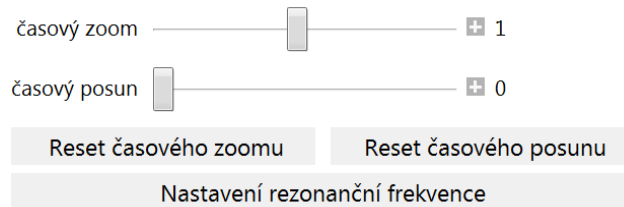
5.1.2 Vizualizační okno sériového zapojení R-L-C

V hlavním vizualizačním okně (obr.39.) najdeme schéma tohoto zapojení, vykreslení průběhu proudu a napětí, včetně zobrazení hodnoty fázového posunu. Dále se zde nachází rezonanční křivka s údajem aktuální rezonanční frekvence a fázorový diagram napětí.



Obr. 39. Vizualizační okno sériového zapojení R-L-C.

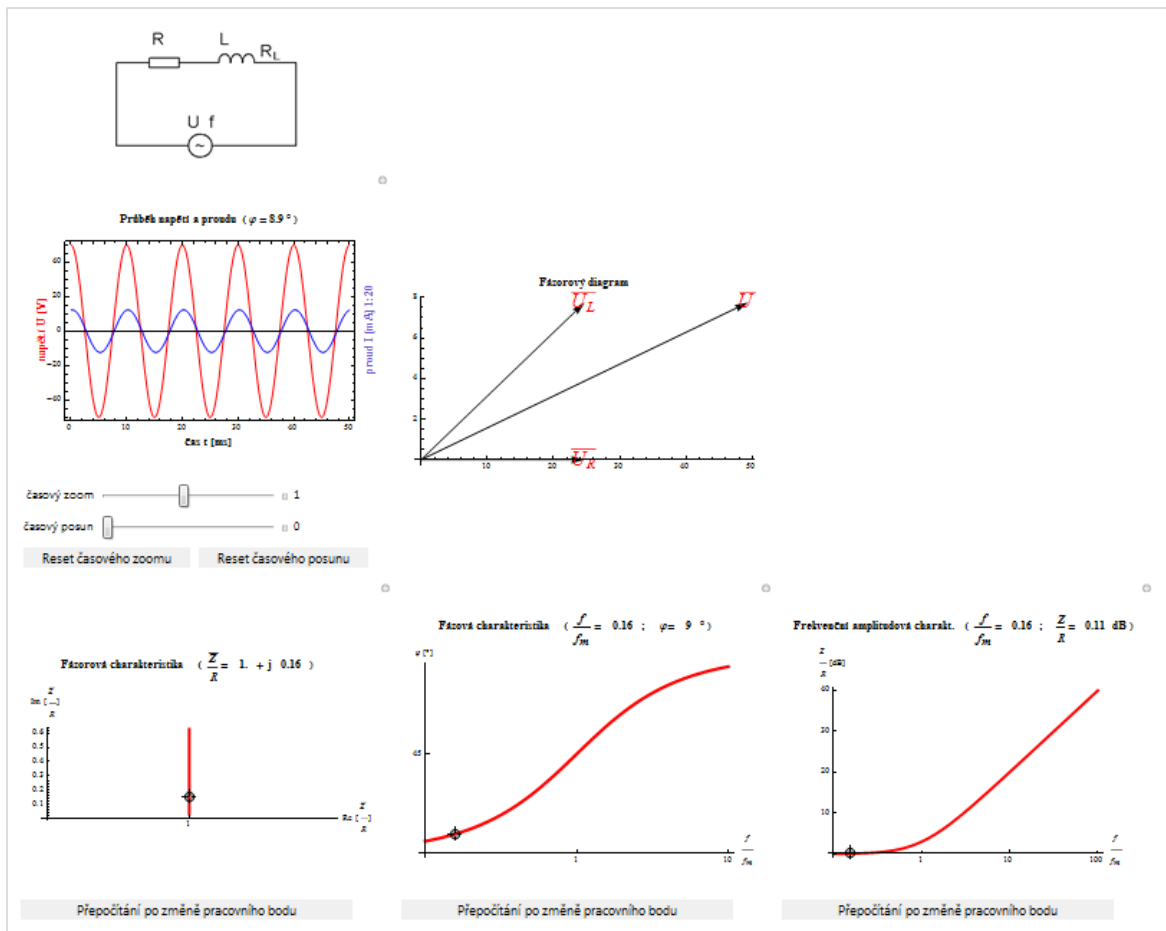
Při vyšších kmitočtech se zobrazení průběhu napětí a proudu stává nečitelným. Z toho důvodu je k dispozici ovládací panel (obr.40.), kde lze regulovat zoom časové osy a také její posun. Obě hodnoty můžeme vrátit do defaultní pozice kliknutím na tlačítka *Reset...*. Za účelem modelování děje zvané rezonance slouží tlačítko *Nastavení rezonanční frekvence*, jenž vyvolá v obvodu rezonanci změnou frekvence.



Obr. 40. Ovládací prvky pro zobrazení průběhů.

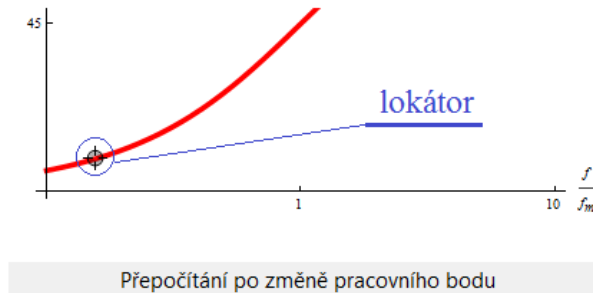
5.1.3 Vizualizační okno sériového zapojení R-L

V hlavním vizualizačním okně (obr.41.) najdeme schéma tohoto zapojení, vykreslení průběhu proudu a napětí, včetně zobrazení hodnoty fázového posunu. Dále se zde nachází fázorový diagram napětí a příslušné charakteristiky zobrazující také specifické hodnoty.



Obr. 41. Vizualizační okno sériového zapojení R-L.

Charakteristiky jsou doplněny o funkci zvanou lokátor (obr.42.), která je defaultně umístěna v aktuálním pracovním bodě. Kliknutím na jiné místo charakteristiky lokátor přesuneme a kliknutím na tlačítko *Přepočítání po změně pracovního bodu* dojde ke změně pracovního bodu na požadovanou pozici.

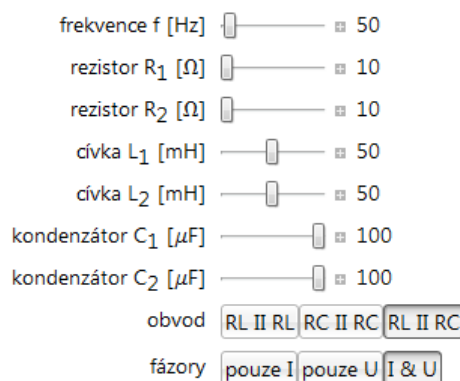


Obr. 42. Funkce Lokátor.

5.2 Hybridní zapojení

5.2.1 Postranní panel s ovládacími prvky

V postranním panelu (obr.43.) se nachází jezdce, kterými posunutím volíme parametry použité ve zvoleném zapojení. Dále v kategorii *obvod* kliknutím vybíráme ze tří hybridních obvodů a v kategorii *fázory* regulujeme vyobrazení fázorového diagramu. Každá změna se hned projeví.

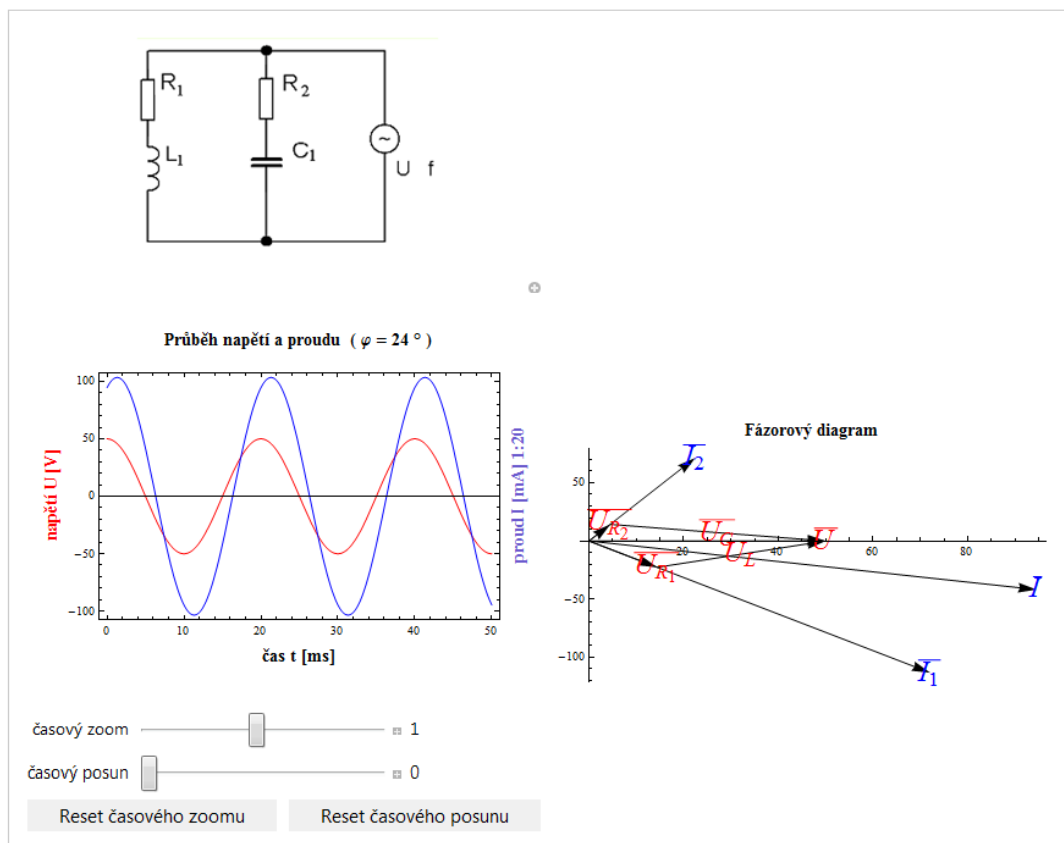


Obr. 43. Postranní panel programu

3.hybridni_zapojeni.nb.

5.2.2 Vizualizační okno hybridního zapojení R-L||R-C

V hlavním vizualizačním okně (obr.44.) najdeme schéma tohoto zapojení, vykreslení průběhu proudu a napětí, včetně zobrazení hodnoty fázového posunu a ovládacího panelu pro zoom a posun časové osy. Dále se zde nachází fázorový diagram napětí a proudů, ve kterém můžeme regulovat zobrazované fázory pomocí tlačítek umístěných v postranním panelu programu (obr.43.).



Obr. 44. Vizualizační okno hybridního zapojení R-L || R-C.

6 ZDROJOVÝ KÓD PROGRAMŮ

Každý vytvořený program obsahuje svůj vlastní zdrojový kód, rozčleněný podle účelu do několika kategorií (obr.45.). Struktura je ve všech programech obdobná. Ve sdíleném zdrojovém kódu nalezneme společný kód všech dostupných volitelných zapojení daného programu. Dále následují specifické kódy pro určitá zapojení. Zdrojový kód s příkazem Manipulate se již zaměřuje na samotnou vizualizaci výsledků z předchozích částí.



Obr. 45. Ukázková struktura zdrojového kódu.

Ukázkový zdrojový kód blíže popsán níže. Zbylé jsou analogické.

6.1 Sériová zapojení

6.1.1 Sdílený zdrojový kód

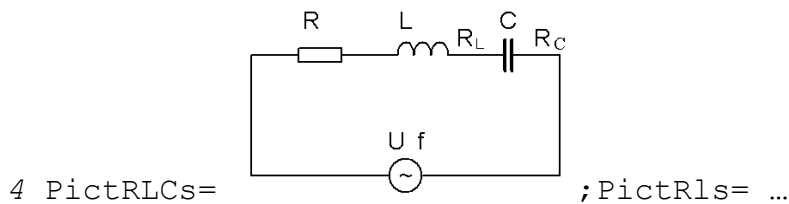
```
1 L[l_] := 1 * 10-3;
```

```
2 c[k_] := k * 10-6;
```

Definování pomocných proměnných pro pohodlnější práci s hodnotami kapacity kondenzátoru a indukčnosti cívky. V ovládací části programu nastavujeme tyto hodnoty v jednotkách mH a μF , ve zdrojovém kódu se však výpočty provádí s hodnotami v základních jednotkách.

```
3 U=50;
```

Navolení hodnoty napětí zdroje.



Přiřazení obrázků schémat zapojení do proměnných.

6.1.2 Zdrojový kód pro sériové zapojení R-L-C

```
1  X1[f_] := 2πfL[l] - 1 / (2πfc[k]);
2  z1[R_, Rl_, Rc_] := √((R + Rl + Rc)² + X1[f]²)
3  i1[U_] := U / z1[R, Rl, Rc];
```

Výpočet celkových hodnot reaktance X , impedance Z a proudu I a jejich přiřazení do proměnných.

```
4  φr1 := Sign[U11 - Uc1] * VectorAngle[{Ur1[R] + Ur1l[Rl] + Urc1[Rc],
    Ux1l[f] - Uxc1[f]}, {10, 0}];
5  φs1 := φr1 / Degree // N;
```

Výpočet fázového posunu φ v radiánech podle umístění fázoru výsledného napětí vzhledem k poloze fázoru proudu pomocí funkce *VectorAngle*. Po upravení znaménka pomocí funkce *Sign* následuje převod předchozí hodnoty do stupňů pomocí funkce *Degree*. Opět přiřazení výsledků do proměnných.

```
6  Ur1[R_] := R * i1[U];
7  Ur1l[Rl_] := Rl * i1[U];
8  Ux1l[f_] := 2π f L[l] * i1[U];
9  U11 := √((Ur1l[Rl])² + (Ux1l[f])²);
10 Urc1[Rc_] := Rc * i1[U];
11 Uxc1[f_] := 1 / (2π f c[k]) * i1[U];
12 Uc1 := √((Urc1[Rc])² + (Uxc1[f])²);
```

Výpočet dílčích napětí na rezistoru (U_r), cívce (U_l) a kondenzátoru (U_c). Rovněž jsou zde zahrnuty výpočty činné a reaktanční složky cívky (U_{rl} , U_{xl}) a kondenzátoru (U_{rc} , U_{xc}). Výsledky přiřazený do proměnných.

$$13 \text{ fo1} := \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L[l] * c[k]}} // N;$$

Výpočet rezonanční frekvence a jeho přiřazení do proměnné.

```
14 graph1:=Graphics[{Arrow[{{0,0},{Ur1[R],0}},Arrow[{{0,0},
  {Ur11[Rl],Ux11[f]}]},Arrow[{{0,0},{Urc1[Rc],-Uxc1[f]}]},
  Arrow[{{0,0},{Ur11[Rl]+Urc1[Rc],Ux11[f]-Uxc1[f]}]},
  Arrow[{{0,0},{Ur1[R]+Ur11[Rl]+Urc1[Rc],Ux11[f]-Uxc1[f]
  }]}],Axes->True,AspectRatio->0.5,ImageSize->{400,300},
  PlotLabel->Style["Fázorový diagram",14,Bold,Black]];
```

Sestavení fázorového diagramu napětí (funkce *Arrow*), povolení zobrazení os (funkce *Axes*) a nastavení jejich poměru (funkce *AspectRatio*). Dále navolení velikosti diagramu (funkce *ImageSize*) a jeho název (funkce *PlotLabel*). Diagram přiřazen do proměnné.

```
15 graph2:=Graphics[Text[Style["UR",Red,Large],{Ur1[R],0}]];
```

```
16 graph3:=Graphics[Text[Style["UC",Red,Large],{Urc1[Rc],
  -Uxc1[f]}]];
```

```
17 graph4:=Graphics[Text[Style["UL",Red,Large],{Ur11[Rl],
  Ux11[f]}]];
```

```
18 graph5:=Graphics[Text[Style["ULC",Red,Large],{Ur11[Rl]+
  Urc1[Rc],Ux11[f]-Uxc1[f]}]];
```

```
19 graph6:=Graphics[Text[Style["U",Red,Large],{Ur1[R]+
  Ur11[Rl]+Urc1[Rc],Ux11[f]-Uxc1[f]}]];
```

Pojmenování fázorů fázorového diagramu (funkce *Text*), nastavení barvy a velikosti textu.

Přiřazení do proměnných.

```
20 plot1[U_,f_,t_,phase_]:=Plot[{UCos[2πf*t*tdef*10-3+phase],
  50i1[U]Cos[2πf*t*tdef*10-3-φr1+phase]},{tdef,0,50*t},
  Frame->True,ImageSize->{400,300},PlotStyle->{RGBColor
  1,0,1},ColorData["HTML","Blue"]},Frame->True,
  FrameLabel->{Style["čas t[ms]",14,Bold,Black],
  Style["napětí U[V]",14,Bold,RGBColor[1,0,0]],""},
  Style["proud I [mA] 1:20",14,Bold,ColorData
  ["HTML","StateBlue"]}],Imagesize->{400,300},
  PlotLabel->Style[Row[{"Průběh napětí a proudu",
  "( φ=",Round[φs1],"°)"}],14,Bold,Black]]
```

Nadefinování vykreslení sinusových průběhů napětí a proudu (funkce *Plot*). Zabudované zoomování (**t*) a posun časové osy (*+phase*). Povoleno orámování (funkce *Frame*), nastaveno pojmenování os (funkce *Framelabel*) a barevné odlišení proudu od napětí (funkce *PlotStyle*). Jsou zde nastaveny rozměry okna (funkce *ImageSize*), ve kterém se průběhy zobrazí, a také jeho název včetně uvedené číselné hodnoty fázového posunu (funkce *PlotLabel*). Přiřazeno do proměnné.

```
21 curve1[R_,Rl_,Rc_] := Plot[ $\sqrt{(R+Rl+Rc)^2 + (2*\pi*fg*L[1] - \frac{1}{2*\pi*fg*c[k]})^2}$ , {fg, fo1/2, fo1*2}, ImageSize->{400, 300}, AxesOrigin->{400, 300}, AxesOrigin->{fo1, Automatic}, PlotStyle->{RGBColor[1, 0, 0]}, PlotLabel->Style[Row[{"Rezonanční křivka", ("f0=", fo1, "Hz) "}], 14, Bold, Black], AxesLabel->{"f [Hz]", "Z [Ω]"}]
```

Nadefinování vykreslení rezonanční křivky (funkce *Plot*). Udány rozměry okna (funkce *ImageSize*), ve kterém se křivka zobrazí. Nastaveno pojmenování os (funkce *Axeslabel*) a viditelných hodnot na ose x (funkce *AxesOrigin*). Barevné provedení křivky (funkce *PlotStyle*) a její název včetně uvedené číselné hodnoty rezonanční frekvence (funkce *PlotLabel*). Přiřazeno do proměnné.

6.1.3 Zdrojový kód pro sériové zapojení R-L

```
1 X2[f_] := 2*pi*f*L[1];
2 z2[R_,Rl_] :=  $\sqrt{(R + Rl)^2 + X2[f]^2}$ ;
3 zri1[f_] := 1 + (f/fm1[R, Rl]) i;
4 zrdB1 := 10*Log[10, 1 + (f/fm1[R, Rl])^2];
```

Výpočet reaktance cívky X, celkové impedance Z, poměrné impedance Z/R v komplexních hodnotách i v decibelech. Přiřazení do proměnných.

```
5 fm1[R_,Rl_] :=  $\frac{R+Rl}{2*\pi*L[l]}$  / N;
```

Výpočet mezní frekvence f_m a přiřazení výsledku do proměnné.

```
6 i2[U_] := U/z2[R, Rl];
```

Výpočet proudu I tekoucího obvodem. Přiřazení do proměnné.

```

7  Ur2[R_] := R*i2[U];
8  Ur12[R1_] := R1*i2[U];
9  Ux12[f_] := 2*π*f*L[1]*i2[U];
10 U12 := √((Ur12[R1])2 + (Ux12[f])2);

```

Výpočet dílčích napětí na rezistoru (U_r) a cívce (U_l). Rovněž jsou zde zahrnuty výpočty činné a reaktanční složky cívky (U_{r1} , U_{x1}). Výsledky přiřazeny do proměnných.

```

11 φr2 := VectorAngle[{Ur2[R]+Ur12[R1], Ux12[f]}, {10, 0}];
12 φs2 := φr2/Degree//N;

```

Výpočet fázového posunu ϕ v radiánech podle umístění fázoru výsledného napětí vzhledem k poloze fázoru proudu pomocí funkce *VectorAngle*. Následuje převod předchozí hodnoty do stupňů pomocí funkce *Degree*. Přiřazení do proměnných.

```

13 graph7 := Graphics[{Arrow[{{0, 0}, {Ur2[R], 0}}, Arrow[{{0, 0},
  {Ur12[R1], Ux12[f]}]}, Arrow[{{0, 0},
  Arrow[{{0, 0}, {Ur2[R]+Ur12[R1], Ux12[f]}]}]},
  Axes->True, AspectRatio->0.5, ImageSize->{400, 300},
  PlotLabel->Style["Fázorový diagram", 14, Bold, Black]};

```

Sestavení fázorového diagramu napětí (funkce *Arrow*), povolení zobrazení os (funkce *Axes*) a nastavení jejich poměru (funkce *AspectRatio*). Dále navolení velikosti diagramu (funkce *ImageSize*) a jeho název (funkce *PlotLabel*). Diagram přiřazen do proměnné.

```

14 graph8 := Graphics[Text[Style[" $\overline{U}_R$ ", Red, Large], {Ur2[R], 0}]];
15 graph9 := Graphics[Text[Style[" $\overline{U}_L$ ", Red, Large], {Ur12[R1],
  Ux12[f]}]];
16 graph10 := Graphics[Text[Style[" $\overline{U}$ ", Red, Large], {Ur2[R]+
  Ur12[R1], Ux12[f]}]];

```

Pojmenování fázorů fázorového diagramu (funkce *Text*), nastavení barvy a velikosti textu. Přiřazení do proměnných.

```

17 Plot2[U_, f_, t_, phase_] := Plot[{UCos[2πf*tdef*t*10-3+phase],
  50i2[U]Cos[2πft*tdef*10-3-φr2+phase]}, {tdef, 0, 50*t},
  Frame->True, ImageSize->{400, 300}, PlotStyle->{RGBColor
  1, 0, 0}, ColorData["HTML", "Blue"]}, Frame->True,
  FrameLabel->{Style["čas t[ms]", 14, Bold, Black],

```

```

Style["napětí U[V]", 14, Bold, RGBColor[1, 0, 0]], "",
Style["proud I [mA] 1:20", 14, Bold, ColorData
["HTML", "StateBlue"]]}, Imagesize→{400, 300},
PlotLabel→Style[Row[{"Průběh napětí a proudu",
"( φ=", Round[φs2, .1], "°)"}], 14, Bold, Black]]

```

Nadefinování vykreslení sinusových průběhů napětí a proudu (funkce *Plot*). Zabudované zoomování (*t) a posun časové osy (+phase). Povoleno orámování (funkce *Frame*), nastaveno pojmenování os (funkce *Framelabel*) a barevné odlišení proudu od napětí (funkce *PlotStyle*). Jsou zde nastaveny rozměry okna (funkce *ImageSize*), ve kterém se průběhy zobrazí, a také jeho název včetně uvedené číselné hodnoty fázového posunu (funkce *PlotLabel*). Přiřazeno do proměnné.

```

18 charact1:=ParametricPlot[{Re[zr1[f]], y}, {y, 0.2Abs[Im[zr1
[f]]], 4Abs[Im[zr1[f]]]}, AxesLabel→{"Re [" $\frac{\bar{z}}{R}$ "]", "Im [" $\frac{\bar{z}}{R}$ "]"},
AxesOrigin→Automatic, Ticks→{{0, 1}}, PlotLabel→Style
[Grid[{"Fázorová charakteristika", (" $\frac{\bar{z}}{R}$ "=", Round[Re[zr1[f]
], 0.01], "+j", Round[Im[zr1[f]], 0.01], ")"}], 14, Bold, Black],
ImageSize→{400, 300}, PlotStyle→{RGBColor[1, 0, 0],
Thickness[0.01]}}];

```

Nadefinování vykreslení fázorové charakteristiky (funkce *Plot*). Nastaveno pojmenování os (funkce *Axeslabel*), jejich variabilní průsečík (funkce *AxesOrigin*) a uvedené hodnoty (funkce *Ticks*). Charakteristika pojmenována (funkce *PlotLabel*), zabudováno zobrazování komplexní hodnoty poměrné impedance. Zadány pevné rozměry této charakteristiky (funkce *ImageSize*) a také její zbarvení a tloušťka (funkce *PlotStyle*). Přiřazeno do proměnné.

V řádku 19 a 20 je nadefinované vykreslení fázové a frekvenční amplitudové charakteristiky. Struktura tohoto zdrojového kódu je obdobná řádku 18, proto tyto řádky zde již nejsou uvedeny.

6.1.4 Zdrojový kód s příkazem Manipulate

```

2  manipulate2:=Grid[{{pictRLCs},{Manipulate[plot1[U,f,t,
  phase],{{t,1,"časový zoom"},0.1,2,0.01,Appearance
  →"Labeled"},{phase,0,"časový posun"},0,50*t,1,Appearance
  →"Labeled"}},
  Grid[{{Button["Reset časového zoomu",t=1,
  Appearance→"Palette"],Button["Reset časového posunu",
  phase=0,Appearance→"Palette"]}}],Button["Nastavení
  rezonanční frekvence",f=f01,Appearance→"Palette"],
  TrackedSymbols→Manipulate,ControlPlacement→Bottom,
  SaveDefinitions→True,Paneled→False],
  curve1[R,Rl,Rc],
  Show[graph1,graph2,graph3,graph4,graph5,graph6]}}}

```

Přípravný zdrojový kód pro hlavní vizualizační kód (řádek 9). Přiřazen do proměnné. Definuje umístění schématu zapojení, průběhu napětí a proudu, rezonanční křivky a fázorového diagramu (funkce *Grid*). Do průběhu napětí a proudu je zde implementováno zoomování a posun časové osy (funkce *Manipulate*). Vybaveno též tlačítky pro resetování do defaultních hodnot po použití těchto doplňků a také pro nastavení rezonanční frekvence (funkce *Button*). Zmíněné dodatečné ovládací prvky se objeví pod oknem s průběhem napětí a proudu (funkce *ControlPlacement*).

```

3  manipulate3:=...
  {Manipulate[Graphics[character1,PlotRange→2],Button["
  Přepočítání po změně pracovního bodu
  ",f=x[[2]]*fm1[R,Rl],Appearance→"Palette"],{{x,{
  Re[zr1l[f]],Im[zr1l[f]]}},Locator},Paneled→False,
  ControlPlacement→{Bottom}],
  ...}}]

```

Jedná se opět o přípravný zdrojový kód pro hlavní vizualizační kód (řádek 9). Přiřazen do proměnné. Úvodní část, nahrazena třemi tečkami, je obdobná řádce 2. Vyobrazená část implementuje do fázorové charakteristiky doplněk pro zobrazení a změnu pracovního bodu (funkce *Locator*, obr.42.) včetně tlačítka pro aplikaci změny pracovního bodu udanou lokátorem (funkce *Button*). Závěrečná část, nahrazena třemi tečkami, implementuje stejným způsobem funkci *Locator* do zbývajících charakteristik.

```

9 Manipule[Which[Rezistor==False&&Cívka==False&&Kondenzátor
==False,manipulate1,Rezistor==True&&Cívka==True&&
Kondenzátor==True,manipulate2,Rezistor==True&&
Cívka==True&&Kondenzátor==False,manipulate3,Rezistor
==True&&Cívka==False&&Kondenzátor==True,manipulate4,
Rezistor==False&&Cívka==True&&Kondenzátor==True,
manipulate5,Rezistor==True&&Cívka==False&&Kondenzátor
==False,manipulate6,Rezistor==False&&Cívka==True&&
Kondenzátor==False,manipulate7,Rezistor==False&&Cívka
==False&&Kondenzátor==True,manipulate8],
{{f,100,"frekvence f [Hz]},1,1000,.1,Appearance→
"Labeled",ImageSize→Tiny},
{{R,100,"rezistor R [ $\Omega$ ]"},1,100,.1,Appearance→
"Labeled",ImageSize→Tiny},
{{l,50,"cívka L [mH]},1,100,.1,Appearance→
"Labeled",ImageSize→Tiny},
{{R,100,"odpor cívky RL [ $\Omega$ ]"},1,100,.1,Appearance→
"Labeled",ImageSize→Tiny},
{{k,50,"kondenzátor C [ $\mu$ F]},1,100,.1,Appearance→
"Labeled",ImageSize→Tiny},
{{Rc,100,"odpor kondenzátoru RC [ $\Omega$ ]"},0,100,.1,Appearance→
"Labeled",ImageSize→Tiny},
{Rezistor,{True,False}},{Cívka,{True,False}},
{Kondenzátor,{True,False}},TrackedSymbols→Manipulate,
ControlPlacement→{Left},SaveDefinitions→True]

```

Hlavní vizualizační zdrojový kód. Vytváří grafické uživatelské rozhraní pro modelování dějů (funkce *Manipulate*). Tento kód se skládá ze dvou částí. V první části je stanoveno, za jakých podmínek se mají aplikovat jednotlivé přípravné zdrojové kódy, tzn. kdy se bude které zapojení simulovat (funkce *Which*). Následuje úsek definující ovládací část vizualizačního uživatelského okna. Vytváří jednotlivé jezdce pro nastavení parametrů zapojených součástek a také rozhraní pro samotný výběr obvodu (součást funkce *Manipulate*).

6.2 Hybridní zapojení

Zdrojový kód tohoto zapojení je obdobný již popsanému v předchozí podkapitole. Zmíním zde pouze některé výrazné odlišnosti.

Pro přehlednější práci s fázorovým diagramem byl implementován doplněk pro výběr zobrazených fázorů. Z toho důvodu obsahuje zdrojový kód některé části ve třech alternativách s ohledem na výběr fázorů. Rozlišeno v názvu přiřazovaných proměnných. Např. *graph66U* upraven pro zobrazení výhradně napěťových fázorů, *graph66I* proudových fázorů, *graph66* proudových i napěťových fázorů.

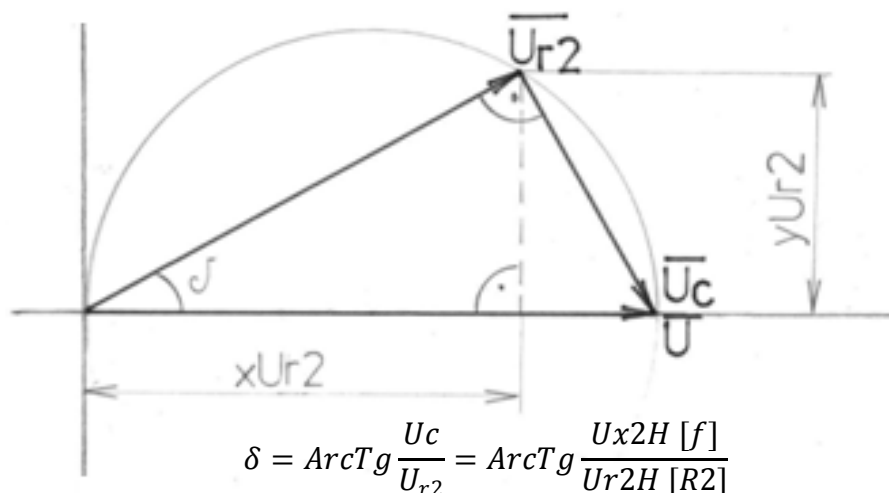
6.2.1 Zdrojový kód pro hybridní zapojení R-L||R-C

```

11 xUr1:=Ur1H[R1]*Cos[ArcTan[Ux1H[f]/Ur1H[R1]]];
12 yUr1:=Ur1H[R1]*Sin[ArcTan[Ux1H[f]/Ur1H[R1]]];
13 xUr2:=Ur2H[R2]*Cos[ArcTan[Ux2H[f]/Ur2H[R2]]];
14 yUr2:=Ur2H[R2]*Sin[ArcTan[Ux2H[f]/Ur2H[R2]]];
15 xiz1:=(xUr1*izH1[U])/Ur1H[R1];
16 yiz1:=(yUr1*izH1[U])/Ur1H[R1];
17 xiz2:=(xUr2*izH2[U])/Ur2H[R2];
18 yiz2:=(yUr2*izH2[U])/Ur2H[R2];

```

Jedná se o pomocné výpočty pro realizaci vyobrazení fázorového diagramu (obr.19.). Vycházejí z předpokladu aplikace Thaletovy kružnice na fázory napětí (obr.46.). Řádky 11-18 představují souřadnice fázorů U_{R1} [11,12], U_{R2} [13,14], I_1 [15,16], I_1 [17,18].



Obr. 46. Princip výpočtů souřadnic fázorů pro fázorový diagram.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo nabídnout alternativu ke stávajícím simulačním aplikacím v podobě software, který se specializuje na hlubší zkoumání vybraných RLC obvodů, a zároveň tak poukázat na schopnosti prostředí Mathematica. Řekl bych, že stanovený cíl jsem naplnil a nabídl tak uživatelsky přívětivé konfigurovatelné programy pro modelování dynamických dějů v elektronických obvodech.

Vytvořený software obsahuje navíc implementované funkce, jež jsem v jiných řešeních hledal marně. Jedná se zejména o vyobrazení fázorových diagramů a pokročilou činnost s pracovním bodem charakteristik. Unikátní je v tom, že si ho může uživatel, pokud se orientuje v prostředí Mathematica a za předpokladu dodržení licence, upravit podle svých potřeb nebo doplnit o další obvody.

Této oblasti bych se v určité formě chtěl věnovat i dále v rámci diplomové práce.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

The aim of this work was to offer an alternative to existing simulating programs in the form of software, which is specialized on deeper investigation into chosen RLC circuits, and also to demonstrate that Mathematica environment is ready for use. I think I have been completing the defined aim so I am offering user-friendly adjustable programs for simulation of dynamic processes in electronic circuits.

Created software includes in addition some implemented functions, which I was looking at other solutions with no effect for. Especially displaying of phasor diagrams and advanced working with an operating point of characteristics. If an user is able to work in Mathematica environment and respect the license, he can modify the software where necessary or implement another circuits. It is unique in that way.

I would put brain to this theme sphere in some form within the scope of my thesis too.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky - 1. díl : základy elektroniky, ideální a reálné prvky: rezistor, kondenzátor, cívka* . Praha : BEN - technická literatura, 2005. 338 s. ISBN 80-7300-146-2.
- [2] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky - 4. díl : přenosy v lineárních obvodech a úvod do zesilovačů* . Praha : BEN - technická literatura, 2006. 295 s. ISBN 80-7300-185-3.
- [3] CHRAMCOV, Bronislav. *Základy práce v prostředí Mathematica* . Vyd. 1. . Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2005. 122 s. ISBN 80-7318-268-8.
- [4] LÁNÍČEK, Robert. *Elektronika : obvody, součástky, děje*. 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 1998. 478 s. ISBN 80-8605-625-2.
- [5] MALINA, Václav. *Poznáváme elektroniku I* . 3. upr. a rozš. vyd. . České Budějovice : Kopp, 2001. 222 s. ISBN 80-7232-039-4.
- [6] MIKULA, Radek. *Simulace elektronických obvodů*. Zlín, 2005. 66 s. Bakalářská práce. UTB ve Zlíně, Fakulta technologická.
- [7] Wolfram Research [online]. c2010 [cit. 2010-02-30]. Wolfram Mathematica Documentation Center. Dostupné z WWW:
<<http://reference.wolfram.com/mathematica/guide/Mathematica.html>>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

- C Označení kondenzátoru a také jeho základní vlastnosti, kapacity.
- L Označení cívky a také její základní vlastnosti, indukčnosti.
- R Označení rezistoru a také jeho základní vlastnosti, odporu.
- RLC Obvody s rezistorem, cívkou a kondenzátorem.
- R-L Sériové zapojení rezistoru a cívky.
- R||L Paralelní zapojení rezistoru a cívky.
- UTB Univerzita Tomáše Bati.
- VF Vysokofrekvenční.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Fázorový diagram rezistoru.	11
Obr. 2. Fázorový diagram ideální cívky.	12
Obr. 3. Fázorový diagram ideálního kondenzátoru.	13
Obr. 4. Schéma sériového zapojení R-L-C.	14
Obr. 5. Fázorový diagram sériového obvodu R-L-C.	14
Obr. 6. Rezonanční křivka sériového obvodu R-L-C.	15
Obr. 7. Fázorový diagram sériového obvodu R-L.	15
Obr. 8. Charakteristiky sériového obvodu R-L – fázorová, fázová, frekvenční amplitudová.	16
Obr. 9. Fázorový diagram sériového obvodu R-C.	16
Obr. 10. Charakteristiky sériového obvodu R-C– fázorová, fázová, frekvenční amplitudová.	17
Obr. 11. Schéma paralelního zapojení RLC.	17
Obr. 12. Fázorový diagram paralelního obvodu RC.	18
Obr. 13. Rezonanční křivka paralelního obvodu RLC.	18
Obr. 14. Fázorový diagram paralelního obvodu RL.	19
Obr. 15. Charakteristiky paralelního obvodu RL–fázorová, fázová, frekvenční amplitudová.	19
Obr. 16. Fázorový diagram paralelního obvodu RC.	20
Obr. 17. Charakteristiky paralelního obvodu RC–fázorová, fázová, frekvenční amplitudová.	20
Obr. 18. Schéma hybridního zapojení.	20
Obr. 19. Fázorový diagram hybridního zapojení.	21
Obr. 20. Schéma zapojení integračních článků.	21
Obr. 21. Charakteristiky integračních článků– fázorová, fázová, frekvenční amplitudová.	22
Obr. 22. Schéma zapojení derivačních článků.	22
Obr. 23. Charakteristiky derivačních článků – fázorová, fázová, frekvenční amplitudová.	22
Obr. 24. Schéma zapojení Wienova článku.	23
Obr. 25. Charakteristiky Wienova článku – fázorová, fázová, útlumová.	23
Obr. 26. Schéma zapojení přemostěného T-článku.	23

Obr. 27. Charakteristiky přemostěného T-článku – fázová, útlumová.	24
Obr. 28. Schéma zapojení souměrného dvojitého T-článku.	24
Obr. 29. Charakteristiky souměrného dvojitého T-článku – fázová, útlumová.	24
Obr. 30. Integrace nástrojů v Mathematice (z [3]).	25
Obr. 31. Wolfram Mathematica 7 for Students.	26
Obr. 32. Java applet Circuit Simulator.	27
Obr. 33. Simulační software Edison.	28
Obr. 34. Pohled na aplikace OrCAD Capture a PSpice.	29
Obr. 35. Ukázkový screenshot z programu 1.seriova_zapojeni.nb.	32
Obr. 36. Ukázkové grafické rozhraní pro vizualizaci modelování dynamických dějů.	34
Obr. 37. Změna hodnoty napětí.	34
Obr. 38. Postranní panel programu 1.seriova_zapojeni.nb.	35
Obr. 39. Vizualizační okno sériového zapojení R-L-C.	35
Obr. 40. Ovládací prvky pro zobrazení průběhů.	36
Obr. 41. Vizualizační okno sériového zapojení R-L.	36
Obr. 42. Funkce Lokátor.	37
Obr. 43. Postranní panel programu 3.hybridni_zapojeni.nb.	37
Obr. 44. Vizualizační okno hybridního zapojení R-L II R-C.	38
Obr. 45. Ukázková struktura zdrojového kódu.	39
Obr. 46. Princip výpočtů souřadnic fázorů pro fázorový diagram.	47

SEZNAM PŘÍLOH

P I CD

PŘÍLOHA P I: CD

Bakalářská práce v elektronické podobě.

Jasek_M.-Bakalarska_Prace_2010.pdf

Vytvořené programy spustitelné v prostředí Wolfram Mathematica.

1.seriova_zapojeni.nb

2.paralelni_zapojeni.nb

3.hybridni_zapojeni.nb

4.mustkova_zapojeni.nb