

STAVEBNICOVÝ PROGRAM PRO SIMULACI LINEÁRNÍCH ELEKTRONICKÝCH OBVODŮ

Juraj Valsa

Ústav teoretické a experimentální elektrotechniky,
Fakulta elektrotechniky a informatiky VUT v Brně

Abstract

The paper describes a set of approximately 30 Matlab scripts and functions for symbolic, semi-symbolic and numerical simulation of linear and linearized electrical and/or electronic networks. The simulation is based on the netlist describing the electrical scheme to be solved. The modified node voltage method is then used to formulate network matrices. The user selects the simulation procedure by choosing the sequence of scripts that perform individual simulation steps. The simulation then results in zeros and poles of the network function, coefficients of the numerator and denominator polynomials, frequency responses including group delay and sensitivities to the variations of parameters of network elements, impulse and step responses, responses to a given input periodic or non-periodic signal. Each response can be solved in several different ways according to the choice of the user. Thus, the prepared scripts allow to compare individual simulation procedures as to their speed, accuracy and reliability.

Sada přibližně 30 skriptů a funkcí v Matlabu umožňuje symbolickou, semisymbolickou a numerickou simulaci lineárních a linearizovaných elektrických resp. elektronických obvodů. Simulace vychází z popisu schématu (netlistu). Program na základě modifikované metody uzlových napětí sestaví matice nesetrvačných a akumulčních obvodových prvků. Uživatel má pak možnost stanovit postup řešení volbou posloupnosti příkazů, jimiž aktivuje jednotlivé připravené skripty. Výsledkem simulace mohou být nulové body a póly obvodové funkce, koeficienty polynomů v čitateli a jmenovateli této funkce, kmitočtové charakteristiky včetně skupinového zpoždění a citlivostí na změny parametrů prvků, odezva na jednotkový impuls a skok, odezva na zadaný periodický vstupní signál, odezva na zadaný vstupní signál libovolného průběhu. Každou zvolenou charakteristiku lze počítat více způsoby podle volby uživatele. Připravené programy dávají tak možnost srovnání jednotlivých postupů podle rychlosti, přesnosti a spolehlivosti.

Úvod

Pro účely výuky i pro potřeby výzkumu jsme v Ústavu teoretické a experimentální elektrotechniky Fakulty elektrotechniky a informatiky Vysokého učení technického v Brně vytvořili sadu m -souborů, určených pro simulaci lineárních a linearizovaných elektrických resp. elektronických obvodů. Připravené soubory (ve většině případů jde o skripty) umožňují experimentovat s algoritmy a srovnávat je z hlediska použitelnosti pro danou aplikaci. Soubory jsou psány ve srozumitelné formě a tvoří otevřenou sadu, která může být snadno upravována a doplňována podle konkrétních potřeb uživatele.

Jednotlivé simulační úrovně

Simulace obvodů je založena na řešení obvodových rovnic formulovaných na základě modifikované metody uzlových napětí. Tato metoda dovoluje popsat lineární obvod složený

z pasivních obvodových prvků typu G, R, C a L (s případnými vzájemnými vazbami M), 4 typů řízených zdrojů a ideálních operačních zesilovačů. Parametry všech obvodových prvků musí být konstantní v čase. Rovnice obvodu mají v maticové formě tvar

$$(G + pC)X = B,$$

kde

G je matice parametrů nesetřvačných prvků (vodivosti, odpory, parametry řízených zdrojů),

C je matice parametrů akumulacních prvků (kapacity, indukčnosti, vzájemné indukčnosti),

p je operátor derivace podle času d/dt ,

X je vektor neznámých uzlových napětí a přidaných proudů,

B je vektor nezávislých zdrojů proudů a napětí.

Program řeší imitanční a přenosové funkce obvodu. V současné době rozlišuje 14 úrovní, z nichž každá poskytuje určitý typ simulačních výsledků. Jednotlivé úrovně jsou označeny písmenovým kódem.

a – netlist, základní tabulky

b – matice G, C, Gnum, Cnum v symbolickém tvaru

c – matice G, C, Gnum, Cnum a vektor B numericky

d – symbolické výrazy pro koeficienty polynomů

e – numerické hodnoty koeficientů

f – nulové body a póly

g – kmitočtové charakteristiky

h – citlivosti v kmitočtové oblasti

i – skupinové zpoždění t_g a sklon Bodeho modulové charakteristiky s_a

j – standardní odezvy $g(t)$, $h(t)$ v semisymbolickém tvaru

k – standardní odezvy $g(t)$, $h(t)$ numericky

l – odezva na libovolný vstupní signál

m – ustálená složka odezvy na periodický vstupní signál

Vlastní simulace probíhá tak, že uživatel podle zvolené sekvence postupně volá jednotlivé skripty a přechází z úrovně na další úroveň. Možné přechody jsou vyznačeny ve vývojovém diagramu na obr.1. Příslušné skripty, jimiž jsou tyto přechody realizovány mají označení L_{xy} , kde x je kód úrovně, ze které krok simulace vychází a y je kód cílové úrovně. Tak např. skript (m-soubor) $L_{ef.m}$ počítá kořeny polynomů v čitateli a jmenovateli obvodové funkce z koeficientů těchto polynomů, skript $L_{fe.m}$ naopak počítá koeficienty polynomů z jejich kořenů.

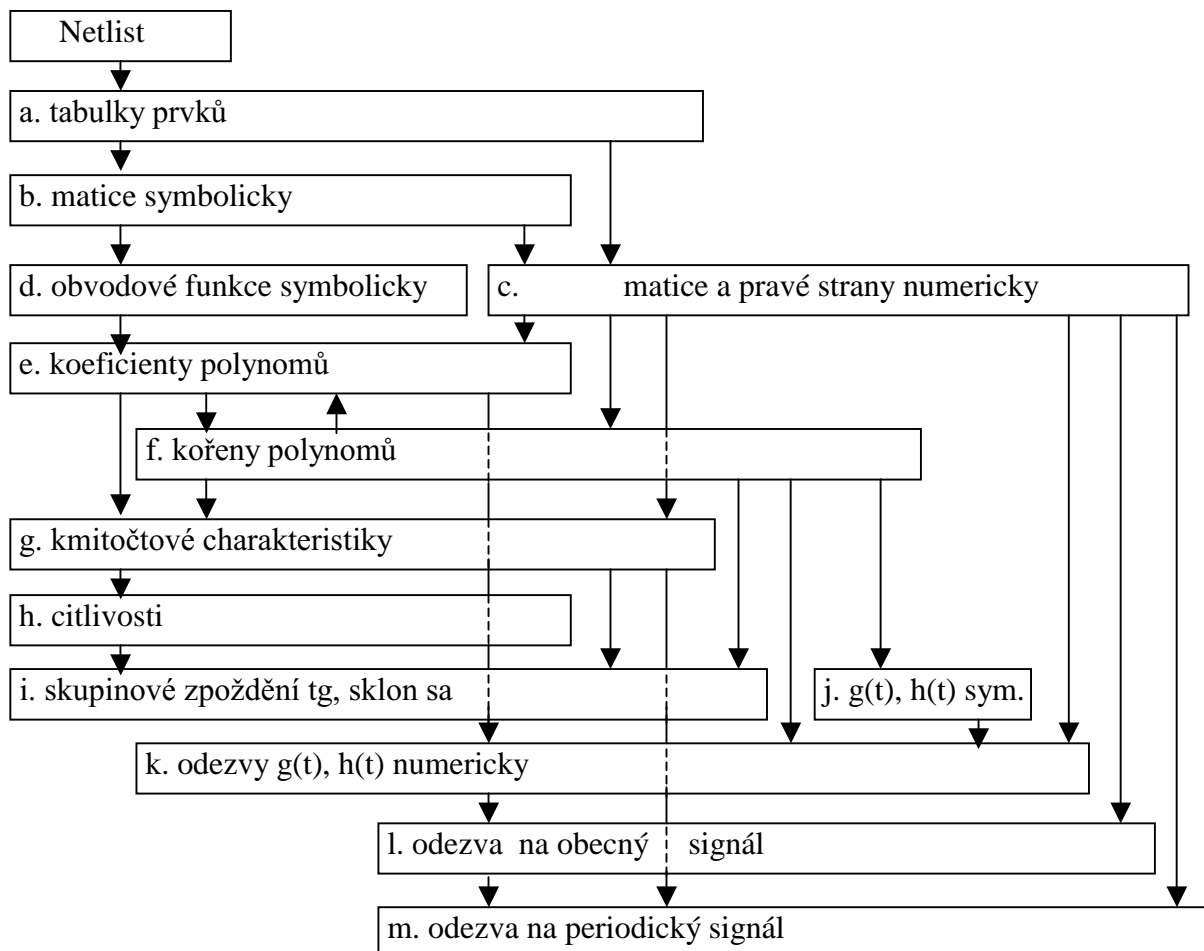
Popis funkce připravených skriptů

Laa.m čte popis řešeného obvodu (netlist) a sestav základní tabulky s údaji o propojení obvodových prvků, o označení parametrů těchto prvků a volbě vstupního a výstupního páru svorek

Lab.m na základě modifikované metody uzlových napětí sestav matice **G** a **C** obvodu v symbolické formě

Lbd.m v symbolické formě počítá subdeterminanty matice $G+pC$ (polynomy v proměnné p) pro čitatele a jmenovatele řešené obvodové funkce

- Lde.m* do subdeterminantů dosad' numerické hodnoty parametrů obvodových prvků; výsledkem jsou koeficienty polynomů
- Lef.m* počítej kořeny polynomu v čitateli (nulové body obvodové funkce) a ve jmenovateli (póly funkce)
- Lac.m* na základě modifikované metody uzlových napětí sestav matice \mathbf{G} a \mathbf{C} obvodu v numerické formě
- Lbc.m* do symbolických matic \mathbf{G} a \mathbf{C} dosad' za parametry obvodových prvků; výsledkem jsou matice \mathbf{G} a \mathbf{C} obvodu v numerické formě
- Lce.m* koeficienty polynomů počítej přímo z numerických matic \mathbf{G} a \mathbf{C} obvodu interpolací na jednotkové kružnici
- Lfe.m* koeficienty polynomů počítej z nulových bodů a pólů obvodové funkce
- Leg.m* počítej a kresli grafy kmitočtových charakteristik (modul, argument, hodograf) dosazením za kmitočet do polynomů v čitateli a jmenovateli obvodové funkce; polynomy jsou popsány pomocí koeficientů
- Lfg.m* počítej a kresli grafy kmitočtových charakteristik (modul, argument, hodograf) dosazením za kmitočet do polynomů v čitateli a jmenovateli obvodové funkce; polynomy jsou popsány pomocí kořenů
- Lcg.m* počítej a kresli grafy kmitočtových charakteristik (modul, argument, hodograf) řešením obvodových rovnic na kmitočtech $p=j\omega$
- Lcf.m* počítej nulové body a póly obvodové funkce řešením zobecněného problému vlastních čísel
- Lgh.m* počítej citlivost obvodové funkce (v kmitočtové oblasti) na změny parametrů obvodových prvků
- Lgi.m* přibližnou numerickou derivací počítej skupinové zpoždění (záporně vzatý sklon argumentové kmitočtové charakteristiky) a sklon Bodeho (modulové kmitočtové) charakteristiky s_a (v decibelech na dekádu kmitočtu)
- Lhi.m* přesně počítej skupinové zpoždění (záporně vzatý sklon argumentové kmitočtové charakteristiky) a sklon Bodeho (modulové kmitočtové) charakteristiky s_a (v decibelech na dekádu kmitočtu) z hodnot citlivostí na parametry akumulčních prvků
- Lfi.m* přesně počítej skupinové zpoždění (záporně vzatý sklon argumentové kmitočtové charakteristiky) a sklon Bodeho (modulové kmitočtové) charakteristiky s_a (v decibelech na dekádu kmitočtu) z polohy nulových bodů a pólů
- Lfj.m* odvod' vzorce pro impulsovou a přechodnou charakteristiku $g(t)$ a $h(t)$ rozvojem obvodové funkce v parciální zlomky a výpočtem reziduí
- Ljk.m* dosazením do vzorců počítej a graficky znázorni impulsovou odezvu $g(t)$ a přechodnou charakteristiku $h(t)$



Obr.1. Vývojový diagram simulace

Lck.m numerickou inverzí Laplaceových obrazů (s možností volby 4 různých metod, viz [1], [3], [4]) počítej a graficky znázorni impulsovou odezvu $g(t)$ a přechodnou charakteristiku $h(t)$. Vzorky obrazů počítej z rovnic obvodu.

Lek.m numerickou inverzí Laplaceových obrazů (s možností volby 4 různých metod, viz [1], [3], [4]) počítej a graficky znázorni impulsovou odezvu $g(t)$ a přechodnou charakteristiku $h(t)$. Vzorky obrazů počítej z koeficientů polynomů.

Lfk.m numerickou inverzí Laplaceových obrazů (s možností volby 4 různých metod) počítej a graficky znázorni impulsovou odezvu $g(t)$ a přechodnou charakteristiku $h(t)$. Vzorky obrazů počítej z kořenů polynomů.

Lcl.m řešením diferenciálních rovnic obvodu počítej odezvu na zadaný vstupní signál a zadané počáteční podmínky

Lkl.m pomocí konvoluce s impulsovou odezvu $g(t)$ počítej odezvu na zadaný vstupní signál

Lcm.m řešením diferenciálních rovnic obvodu počítej periodickou část odezvy na zadaný

periodický vstupní signál. Příslušné počáteční podmínky urči extrapolací pomocí epsilon-algoritmu

Lgm.m počítej periodickou část odezvy na zadaný periodický vstupní signál jako superpozici odezvy obvodu na jednotlivé složky Fourierova rozvoje signálu

Llm.m počítej periodickou část odezvy na zadaný periodický vstupní signál urychlením pomocí epsilon-algoritmu

Doporučené sekvence volání skriptů

1. Symbolická simulace

Obvodová funkce vyjádřena jako podíl polynomů v proměnné p , jejichž koeficienty jsou vyjádřeny symbolicky jako funkce parametrů obvodových prvků.

Laa – Lab – Lbd

2. Semisymbolická simulace

Obvodová funkce vyjádřena jako podíl polynomů v proměnné p s numerickými koeficienty.

Laa – Lab – Lbd – Lde – Lef

resp.

Laa – Lab – Lbc – Lce – Lef

resp. lépe

Laa – Lac – Lce – Lef

resp. ještě lépe

Laa – Lac – Lcf – Lfe

3. Kmitočtové charakteristiky včetně skupinového zpoždění a sklonu s_a

Laa – Lac – Lcg – Lgi

resp.

Laa – Lac – Lcg – Lcf – Lfi

4. Odezvy $g(t)$ a $h(t)$ na standardní vstupní signály numerickou inverzí Laplaceových obrazů

Laa – Lac – Lck

resp.

Laa – Lac – Lcf – Lfk

resp.

Laa – Lac – Lcf – Lfe – Lek

5. Odezvy $g(t)$ a $h(t)$ na standardní vstupní signály v semisymbolické i numerické formě

Laa – Lac – Lcf – Lfj – Ljk

6. Odezva na zadaný vstupní signál libovolného tvaru

$Laa - Lac - Lck - Lkl$
resp.
 $Laa - Lac - Lcl$

Závěr

Připravené programové jednotky jsou určeny pro simulaci lineárních a linearizovaných elektrických a elektronických obvodů se soustředěnými parametry. Další práce jsou zaměřeny na rozšíření možností použití simulačních algoritmů i na obvody s rozprostřenými parametry, tj. obvody, ve kterých jsou úseky přenosových vedení nebo distribuované obvody RC a obvody s nelinearitami.

Práce na tomto projektu byly podpořeny Výzkumným záměrem CEZ J22/98:262200011 a granty Grantové agentury České republiky GAČR pod čísly 102/98/0782 a 102/98/0130.

Literatura

- [1] Vlach, J., Singhal, K.: *Computer Methods for Circuit Analysis and Design*, second edition, Van Nostrand Reinhold, New York 1994
- [2] Valsa, J.: Simulace elektrických a elektronických obvodů v jazyku MATLAB, Sborník příspěvků 7. ročníku konference MATLAB'99, str. 213 – 226
- [3] Valsa, J., Brančík, L.: Approximate Formulae for Numerical Inversion of Laplace Transforms, *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, Vol. 11, (1998), str. 153 – 166
- [4] Brančík, L.: Programs for Fast Numerical Inversion of Laplace Transforms in MATLAB Language Environment with Some Applications, Sborník 23. konference SPETO 2000, Gliwice – Ustron (Polsko), str. 197 – 200

Prof. Ing. Juraj Valsa, CSc., Ústav teoretické a experimentální elektrotechniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky VUT v Brně, Purkyňova 118, 612 00 Brno
tel (05) 4114 9514, e-mail valsa@utee.fee.vutbr.cz