

# Počítačové experimenty s podporou SPICE

ing. Zdeněk Biolek, Ph.D.

SPŠE Rožnov p.R., Školní 1610, 756 61 Rožnov p.R.

[biolek@spseroznov.cz](mailto:biolek@spseroznov.cz)

## Abstrakt

*Příspěvek popisuje některé zkušenosti s výukou elektrotechnických předmětů pomocí standardu SPICE.*

## O jednom problému při výuce elektrotechniky

V [1] jsou popsány některé problémy, které v dnešní době vznikají při výuce elektrotechnických předmětů. Většina z nich může mít svůj původ v tom, že velká část studentů nemá dostatečnou „obvodářskou“ zkušenost, tj. praktickou zkušenost se zapojováním součástek do smysluplného celku. Důsledkem je to, že **student neumí přečíst elektrotechnické schéma**. Schéma je vnímáno jako pouhý obrázek, jako „bitmapa“ bez vnitřní logiky.

Vynikajícím nástrojem k procvičení a upevnění poznatků získaných v předmětech elektrotechnického zaměření se stává (v rukou schopných pedagogů) simulátor elektrických obvodů. Počítačový experiment může být pro studenta skutečně lákavou alternativou, jak si odzkoušet dané zapojení a nevzít přitom do ruky ani páječku. Přímo na počítači si může vyzkoušet, za jak dlouho po zapnutí bude jeho oblíbený zesilovač připraven k činnosti a na které součástce tato doba závisí. Může si „zaexperimentovat“, co se stane, když nahradí vadný tranzistor jiným typem s mírně odlišnými vlastnostmi. Může si zkusit, zda bude jeho výrobek stále ještě fungovat, když ho přemístí z obývacího pokoje do nevytopené garáže.

Mnohé simulátory umí načíst informace o elektrickém obvodu nejen v grafické podobě, tj. jako schéma, ale i v podobě textového souboru, tzv. netlistu SPICE. Jakkoliv složitě zapojení sestavené z libovolných elektrických součástek lze popsat textovým souborem, ze kterého je simulátor schopen vypočítat a zobrazit, jak se toto zapojení bude chovat.

Vzijme se však do myšlení studenta, kterého simulátory docela zaujaly. Tento student si zcela jistě položí následující otázky:

Existuje nějaký rozumný důvod, proč bych se měl učit jakýsi textový standard SPICE? Vždyť psaní textových příkazů není ani zdaleka tak příjemné jako kreslení schématu v editoru! Jakmile se konečně objeví rozumný program, který sám vypočítá a zobrazí všechno, co se v obvodu děje, aniž bych ten obvod musel stavět, objeví se i pedagog, který mě nutí zadávat zapojení v jakési textové podobě!

Tyto otázky jsou zcela namístě. Odpovědět si na ně musí jak studenti, tak i pedagogové.

Odpověď pro studenty: Když budete ovládat zásady SPICE (mimochodem jsou velmi jednoduché a srozumitelné),

- naučíte se světový standard. V tomto formátu publikují modely svých součástek všichni přední výrobci. Z toho důvodu si můžete stáhnout z Internetu SPICE model téměř jakékoliv součástky (tranzistory, diody, nejrůznější

integrované obvody, ale i elektronky, rozmanitá čidla aj.) a odzkoušet si zapojení s touto součástkou na svém počítači.

- můžete si schéma zapojení, které jste nakreslili ve svém oblíbeném programu pro automatický návrh plošných spojů, exportovat do netlistu SPICE a tento použít jako vstupní soubor pro simulátor. Export do simulačního programu přes formát SPICE může být mnohdy jedinou rozumnou možností, jak si odsimulovat činnost zapojení nakresleného v některém editoru pro návrh plošných spojů (systémy typu EAGLE apod.).
- naučíte se časem lépe číst elektrické schéma a také mu lépe rozumět.

Pro studenty by mohly být motivační první dva důvody, třetí důvod je však nejpodstatnější a měli by mu věnovat pozornost hlavně učitelé.

Odpověď pro pedagogy: Činnost při vytváření netlistu SPICE téměř doslova kopíruje postup při fyzickém sestavování obvodu s páječkou v ruce, což je právě ta tvůrčí činnost, která v dnešní době tak chybí.... Jsme totiž nuceni zapojení nejprve analyzovat v tom smyslu, že vyhledáváme všechny napěťové uzly a pak postupně zapisujeme, ke kterým uzlům jsou připojeny vývody jednotlivých součástek. Práce s textovou podobou zapojení má tedy výhodu, že zviditelňuje vnitřní provázanost jednotlivých prvků mezi sebou a že zapojení přestáváme vnímat jako nedělitelný celek, jako celistvý „obrázek“ bez vnitřní logiky. Při vytváření netlistu jsme také automaticky vedeni ke správnému „obvodářskému“ myšlení tím, že se soustředíme jen na to, co je nezbytné pro funkčnost. Informace, které jsou z hlediska funkčnosti nepodstatné, totiž v netlistu vůbec nejsou (způsob tvarování přívodů součástek, jejich fyzická orientace, způsob zalamování spojovacích vodičů apod.).

## Co je to SPICE?

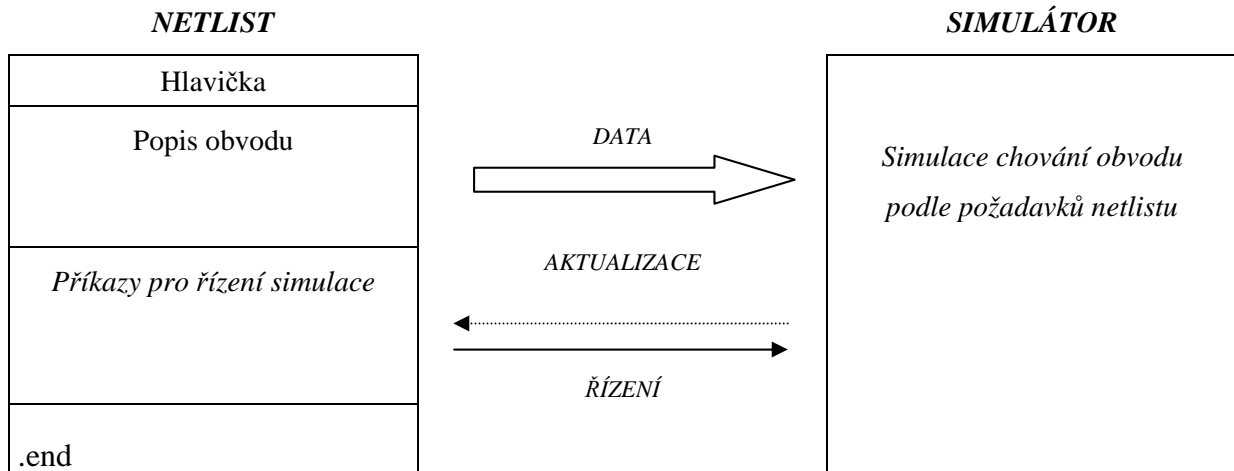
SPICE je zkratka z anglického „Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis“, což volně přeloženo znamená „Simulační program použitelný zejména pro integrované obvody“.

SPICE označuje určitou třídu programů pro simulaci činnosti elektrických obvodů, ale také formát dat, se kterými tyto programy pracují.

Mezi simulační programy standardu SPICE dnes patří např. PSPICE, CADENCE-SPICE, H SPICE, SmartSPICE a další. S datovým formátem SPICE je kompatibilní řada dalších simulátorů jako je např. MicroCap. Simulační program načítá data popisující elektrické zapojení a podle pokynů provádí požadované typy analýz.

Data bývají soustředěna do textového souboru zvaného *netlist*. Tento soubor obsahuje úplný popis obvodu a příkazy pro simulátor.

Netlist se načte do simulátoru, který tak dostane data o elektrickém obvodu a zároveň i příkazy, co má s těmito daty udělat.



Obr. 1: Spolupráce mezi netlistem a simulátorem

Z obr. 1 je možno vyčíst obecnou strukturu netlistu ve formátu SPICE.

**Hlavička** je povinný řádek, který slouží pouze pro dokumentační účely a nemá vliv na průběh simulace.

**Popis obvodu** je část netlistu, ve které jsou popsány vlastnosti všech součástek analyzovaného obvodu a způsob jejich vzájemného propojení.

**Příkazy pro řízení simulace** říkají simulátoru, který typ analýzy se má spustit, s jakými parametry a co se má s výsledky udělat.

Netlist je ukončen příkazem **.end**.

V této struktuře mají své pevné místo pouze hlavička a ukončovací příkaz „.end“. Řádky obsahující popisná data a příkazy pro simulátor mohou být mezi sebou libovolně „promíchány“. Pro lepší čitelnost netlistu se však doporučuje zachovávat přehlednou strukturu podle obr. 1.

Všechny SPICE-kompatibilní simulátory čtou příkazy pro řízení simulace z netlistu. Většinou simulátorů je navíc možno zadat tyto údaje pohodlně přes grafické rozhraní, do kterého se údaje z netlistu načítají pouze jako editovatelné položky. V některých případech je proto možno řídicí příkazy z netlistu úplně vynechat, jak je tomu např. u simulačního programu MicroCap. Řídicí sekce netlistu se pak generuje automaticky až po ukončení první simulace, po každém dalším simulačním běhu se sama aktualizuje (viz obr. 1).

## Jak vyučovat SPICE?

Před studenty je potřeba postavit **cíl**, učitel si musí zvolit vhodnou **metodu** (= cestu) a opatřit si odpovídající **prostředky**.

**Cíl**, který by mohl zaujmout, je rozebrán výše v odpovědi pro studenty.

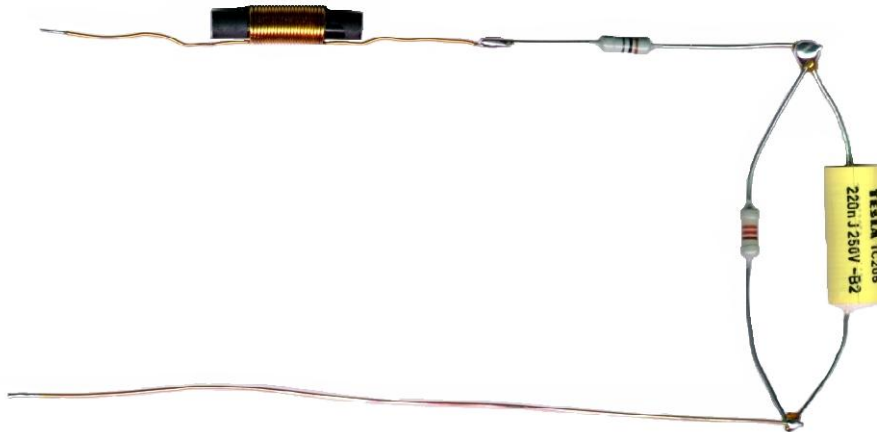
**Metoda** se drží jednoduchosti a názornosti. Zvolili jsme tento postup:

Nejprve je nutné naučit studenty vytvořit netlist podle skutečného zapojení nebo podle jeho schématické předlohy. Tento postup odpovídá potřebám praxe a navíc čeká na konci odměna – zajímavé výstupy ze simulátoru. V další fázi je vhodné postup obrátit a studenti kreslí schéma podle předloženého netlistu. Výsledek nemusí být jednoznačný a schéma je navíc nutno „učesat“, což jsou prvky, kterých může zkušený pedagog mnohostranně využít.

**Prostředky** jsou v našem konkrétním případě obvodový simulátor MicroCap a učební texty [2] „šité na míru“.

### Postup „grafika →netlist“

Dejme tomu, že bychom chtěli provádět pokusy se zapojením podle obr. 2. Na volné svorky bychom nejprve připojili zdroj stejnosměrného napětí (např. plochou baterii 4,5V) a zajímalo by nás, jakým způsobem se budou po připojení zdroje ustalovat napětí a proudy.

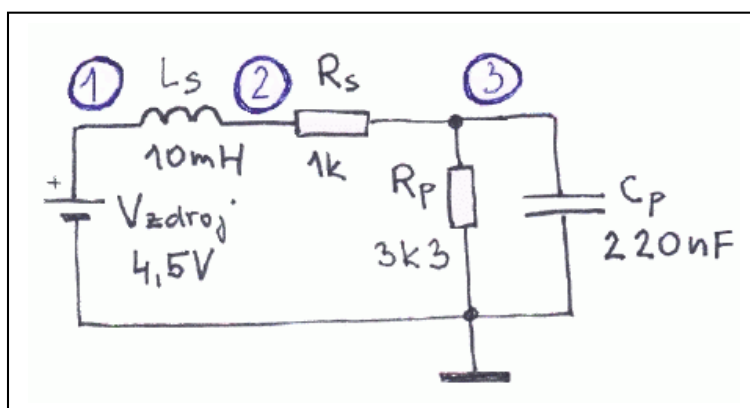


Obr. 2: Příklad skutečného obvodu

Vytvoříme schéma zapojení, vyhledáme a vyznačíme v něm všechny napět'ové uzly. V naší ukázce na obr. 3 jsou za jména uzlů zvolena čísla 1, 2 a 3. Každý obvod musí obsahovat referenční uzel 0 (zem), vůči kterému se vztahují napětí ostatních uzlů.

V této klíčové fázi vyžadujeme, aby studenti používali pracovní sešity. I když žijeme v „počítačovém věku“, stále ještě existují oblasti, ve kterých jsou papír a tužka těmi nepraktičtějšími pomůckami.

Podle pravidel SPICE postupně vytvoříme netlist. Výsledek je na obr. 4.



Obr. 3: Schéma zapojení s vyznačením uzlů

```
Uvodni prikald
*
*
Vzdroj 1 0 4.5V
Ls 1 2 10mH
Rs 2 3 1k
Rp 3 0 3.3k
Cp 3 0 220nF
*Tady by byly prikazy
+ pro rizeni simulace
.end
```

Obr. 4: Netlist SPICE

První řádek je povinná hlavička, poslední řádek obsahuje ukončovací příkaz. Řádky začínající hvězdičkou (\*) jsou komentáře a vše ostatní je popis vlastního zapojení.

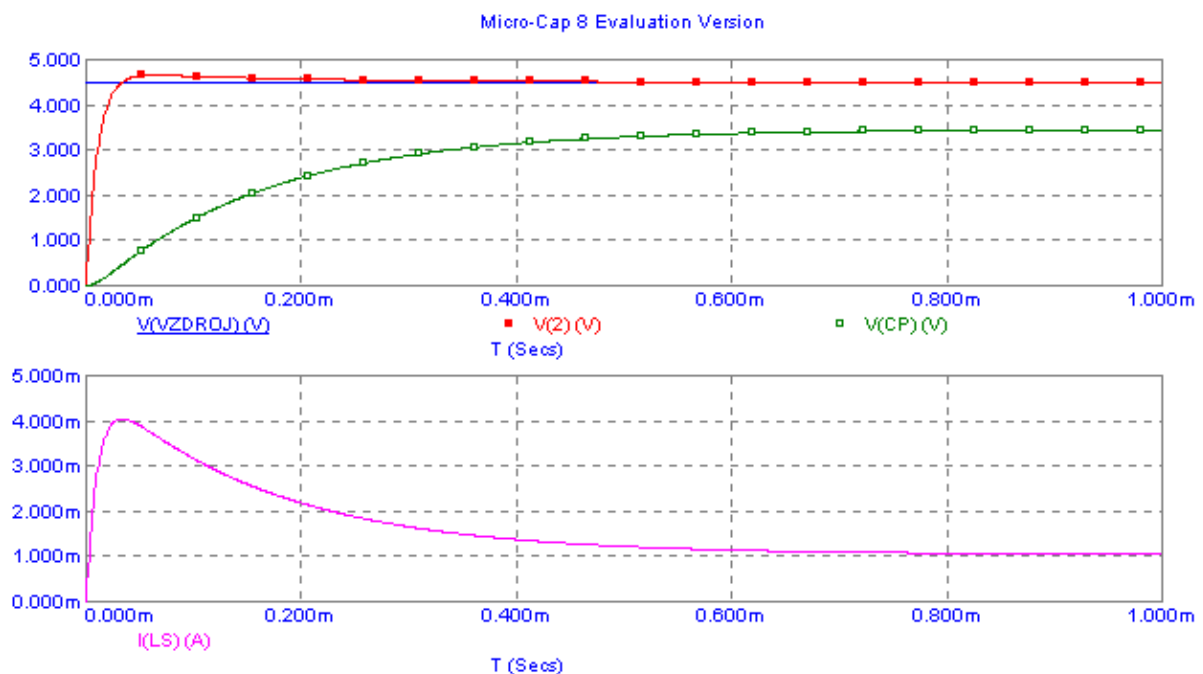
Znak „+“ na začátku řádku znamená, že tento řádek je pokračováním řádku předchozího. Interpret SPICE jej vyhodnotí jako znak pro sčítání textových řetězců. Netlist může být těmito značkami udržován v čitelné podobě i v případech, kdy příkaz přesáhne svou délkou obvyklou mez.

Netlist uchováváme v souboru, odkud si jej načte simulátor. Obvyklé přípony těchto textových souborů jsou CIR (circuit), LIB (library), CKT.

Zapojení podle obr. 3 se dá slovně popsat takto (sledujte přitom odpovídající řádky souboru SPICE na obr. 4):

- Napěťový zdroj  $V_{\text{zdroj}}$  je připojen kladnou a zápornou svorkou na uzly 1 a zem a má hodnotu napětí 4,5V.
- Induktor  $L_s$  je připojen mezi uzly 1 a 2 a má indukčnost 10mH.
- Rezistor  $R_s$  je připojen mezi uzly 2 a 3 a má odpor 1k $\Omega$ .
- Rezistor  $R_p$  je připojen mezi uzly 3 a zem a má odpor 3,3k $\Omega$ .
- Kapacitor  $C_p$  je připojen mezi uzly 3 a zem a má kapacitu 220nF.

Výsledek časové analýzy provedené na simulátoru MicroCap je na obr. 5.



Obr. 5: Výsledek časové analýzy

V naší ukázce figurují pouze pasivní RLC prvky a zdroj konstantního napětí. Formátem SPICE však lze popsat jakkoliv složité zapojení s libovolnými prvky, přičemž obecný princip zápisu je stejný jako v ukázce: na jednotlivých řádcích netlistu se vyjmenují všechny prvky schématu, přičemž struktura řádku se řídí uskupením

- jméno prvku
- seznam uzlů, ke kterým jsou připojeny jeho vývody
- vlastnosti prvku.

Ve SPICE tvoříme zapojení ze základních prvků a z tzv. podobvodů.

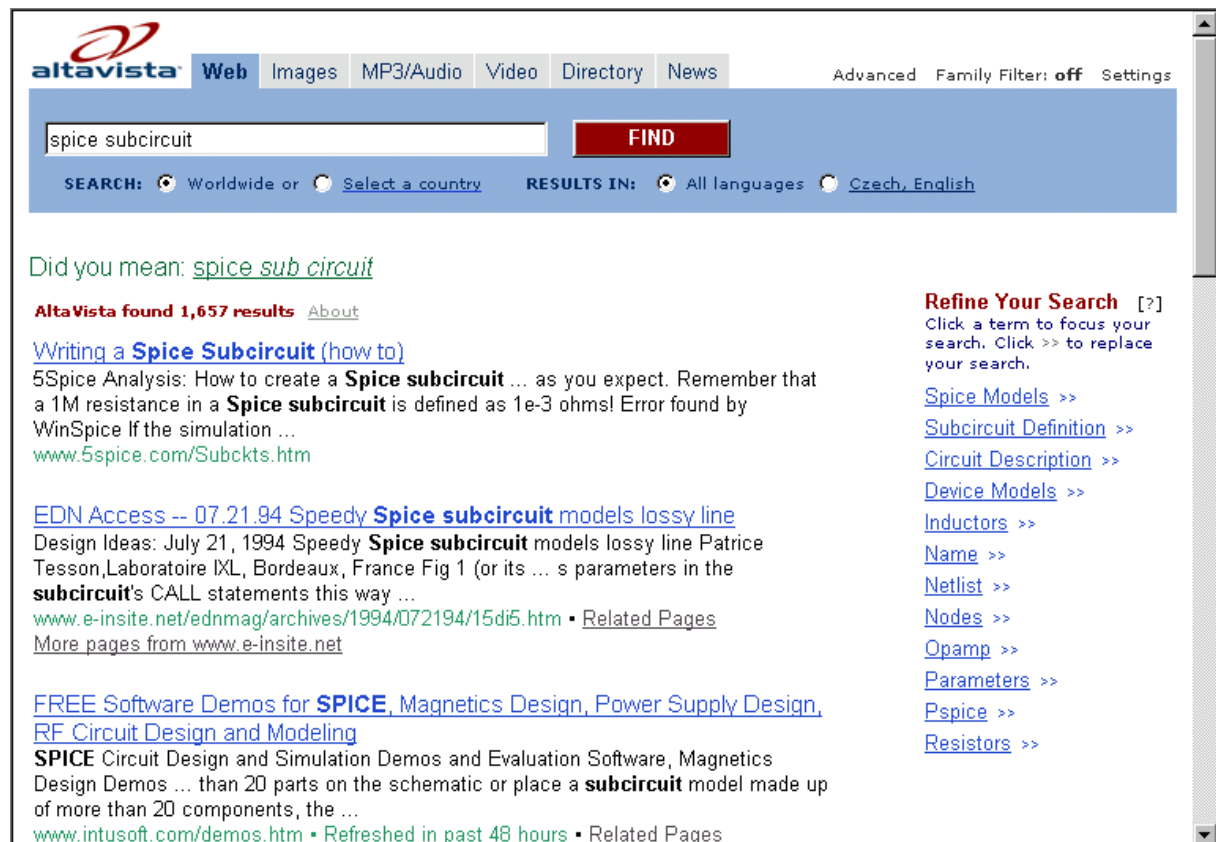
Mezi základní prvky patří pasivní (RLC prvky, zpožďovací linky) a polovodičové součástky (diody, tranzistory všeho druhu), zdroje napětí a proudu (nezávislé i řízené) a jiné (nelineární magnetické materiály, spínací prvky aj.).

Podobvod (angl. Subcircuit) je součástka, která vznikne zapouzdřením složitějšího celku, takže ji můžeme zapojovat do obvodu jako jeden prvek. Jako podobvody jsou např. modelovány celé čipy integrovaných obvodů (IO). Získáním takového modelu (např. od výrobce IO na Internetu) dostáváme možnost přímo si odzkoušet předpokládané chování součástky na simulátoru. Pomocí podobvodů SPICE si tak můžeme doplňovat knihovny simulátoru o modely dalších součástek.

## Hledání modelů na Internetu

Používat ke své práci SPICE – kompatibilní simulátor znamená mít možnost vyzkoušet si chování libovolné součástky, jejíž model najdeme na Internetu.

Podobvody SPICE dnes publikují všichni významní výrobci elektronických součástek. Průměrný vyhledávač vrací tisíce odkazů na současný výskyt klíčových slov „spice“ a „subcircuit“. Tyto odkazy většinou vedou na oficiální stránky výrobců součástek, na soukromé stránky těch, kdo s modely pracují a na stránky s nejrůznějším studijním materiálem.



The screenshot shows the Altavista search engine interface. At the top, there are navigation tabs for 'Web', 'Images', 'MP3/Audio', 'Video', 'Directory', and 'News'. A search bar contains the text 'spice subcircuit' and a red 'FIND' button. Below the search bar, there are options for 'SEARCH:' (Worldwide or Select a country) and 'RESULTS IN:' (All languages or Czech, English). The search results are displayed in a list format. The first result is 'Writing a Spice Subcircuit (how to)' from 5Spice Analysis, with a link to 'www.5spice.com/Subckts.htm'. The second result is 'EDN Access -- 07.21.94 Speedy Spice subcircuit models lossy line' from Design Ideas, with a link to 'www.e-insite.net/ednmag/archives/1994/072194/15di5.htm'. The third result is 'FREE Software Demos for SPICE, Magnetics Design, Power Supply Design, RF Circuit Design and Modeling' from intusoft.com, with a link to 'www.intusoft.com/demos.htm'. On the right side of the search results, there is a 'Refine Your Search' section with a list of related terms: Spice Models, Subcircuit Definition, Circuit Description, Device Models, Inductors, Name, Netlist, Nodes, Opamp, Parameters, Pspice, and Resistors.

Obr. 6. Výsledek vyhledávání na slova „SPICE“ a „subcircuit“

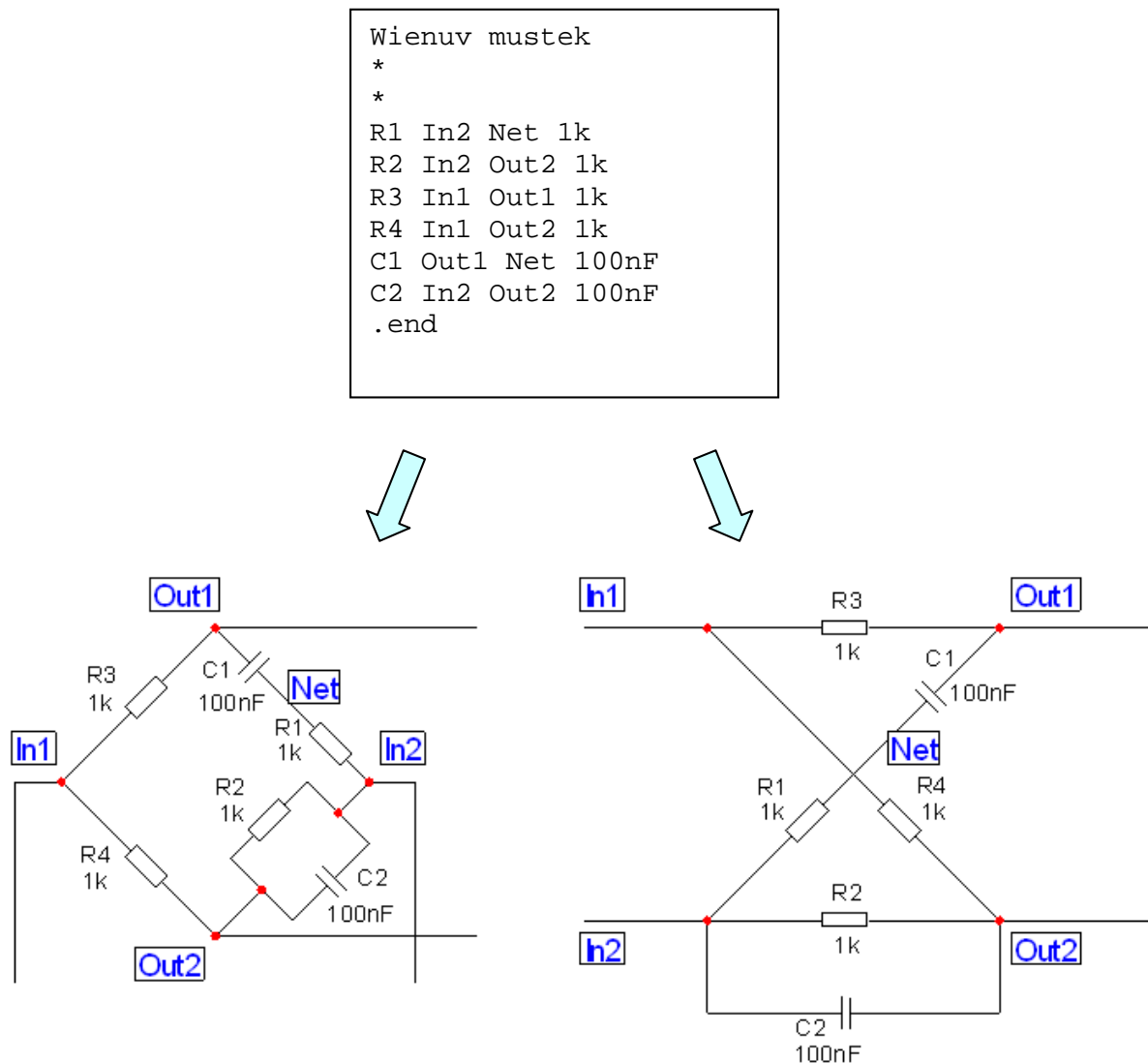
Podobvody je možno získat jako samostatné soubory nebo bývají součástí textu na stránce. V prvním případě stahujeme soubory, ve druhém musíme vytvořit nový soubor, do něhož umístíme text vybraný např. přes schránku. Můžeme se setkat i s podobvodem uvnitř katalogového listu ve formátu PDF.

Finální soubory s podobdou SPICE nemají unifikovanou koncovku, nicméně nejčastěji se setkáme s příponami LIB (library), CIR (circuit), MOD, MDL (model), TXT (text), FAM (family), SP, SP2, SP3 (SPICE). Soubory bývají často k dispozici jako archivy ZIP nebo jako samorozbalovací archivy EXE.

Některé firmy požadují před stažením souboru registraci. Většinou je vyžadována pouze e-mailová adresa.

### Postup „netlist → grafika“

Velmi zajímavé výsledky dává postup, kdy student zpětně vytváří z netlistu grafickou podobu schématu. Při této poměrně náročné práci se musí hodně přemýšlet o vnitřní logice zapojení. Výsledek navíc není jednoznačný, jak ukazuje obr. 7.



Obr. 7. Dvě ekvivalentní zapojení Wienova můstku

Ukázka úlohy, která zaměstná dva studenty:

*Každý z dvojice studentů vytvoří netlist popisující Graetzův usměrňovací můstek napájený zdrojem sinusového napětí  $24V_{ef}/50Hz$  a předá ho svému protějšku. Oba se pak pokusí zpětně rekonstruovat grafickou podobu zapojení včetně původního popisu uzlů a součástek. Nakonec se porovnájí původní a konečné verze schématu.*

## Simulátor

Základy SPICE je možno „trénovat“ na jakémkoli simulátoru kompatibilním s tímto formátem. Dobrou volbou je studentská verze obvodového simulátoru MicroCap (nyní ve verzi 8), která je zdarma k dispozici na internetových stránkách [www.spectrum-soft.com](http://www.spectrum-soft.com). Ovládání tohoto prostředí a mnoho dalších informací je v knize [3].

## Učební texty

Byly vytvořeny učební texty [2] „šité na míru“ potřebám vyučování SPICE na střední odborné škole. Při vypracovávání samostatných projektů, které jsou samozřejmě klasifikovány, smějí studenti využívat všech dostupných informačních zdrojů včetně těchto textů.

Z problematiky SPICE je v této učební pomůcce obsaženo jen to, co je nezbytně nutné pro splnění metodických cílů zmíněných výše. Přestože jsou uvedeny pouze nejzákladnější informace, vytvořil se nám obrovský prostor pro počítačové experimenty s nepřeborným množstvím zajímavých součástek, jejichž modely zdarma nabízejí výrobci na Internetu.

Náhled na obsah učebních textů je uveden v příloze.

## Závěr

Standard SPICE je zařazen do vyučovacích osnov na SPŠE v Rožnově p.R. již třetím rokem. Podle výše popsané metodiky se vyučuje v rámci předmětu Programové vybavení ve 4. ročnících oboru Elektronické počítačové systémy. V současné době celý učební blok SPICE včetně práce na závěrečném projektu zabírá 12 vyučovacích hodin strávených u počítače.

Formát SPICE může být učiteli dobrým pomocníkem v jeho úsilí naučit své studenty správně číst elektrická schémata. Sledujeme-li tento cíl, pak by bylo logické, kdyby se žáci s touto látkou setkali spíše už na začátku studia. V zásadě by to možné bylo, ovšem za cenu toho, že by se učil pouze tento formát bez následných simulací, které by se vyučovaly později. Experiment, který jsme provedli ve šk.r. 1998-99, totiž ukázal, že počítačové simulace elektrických obvodů je vhodné zařadit do výuky nejdříve v průběhu 3. ročníku studia [4]. Bylo by tedy potřebné promyslet, jak a čím studenty v této počáteční fázi motivovat.

## Literatura

[1] Biolek, Z.: SPICE jako pomůcka k porozumění schématu.

Seminář Perspektivy elektroniky, Rožnov p.R., 2003.

[2] Biolek, Z.: Úvod od SPICE pomocí programu MicroCap.

Učební texty SPŠE Rožnov p.R. Sensit Holding, Rožnov p.R. 2004

[3] Biolek, D.: Řešíme elektronické obvody aneb kniha o jejich analýze.

Ben – Technická literatura, Praha 2004, ISBN 80-7300-125-X

[4] Biolek, Z.: Podpora výuky základů elektrotechniky pomocí programu MC5.

Moderní směry výuky elektrotechniky a elektroniky.

Seminář teorie obvodů STO-7, Brno 1999.



The image displays a grid of 32 pages from a technical manual, arranged in 4 rows and 8 columns. The pages contain various technical content related to SPICE simulation:

- Page 1 (top-left):** Title page "UVOD DO SPICE pomocí programu ELABOR".
- Pages 2-8:** Introduction and basic circuit examples, including SPICE code and plots.
- Pages 9-16:** Detailed circuit analysis and simulation results, featuring complex circuit diagrams and multiple plots.
- Pages 17-24:** Further circuit examples and simulation results, including screenshots of the ELABOR software interface.
- Pages 25-32:** Final circuit examples and simulation results, showing various circuit topologies and their corresponding plots.