

Simulace elektronických obvodů

Electronic circuits simulation

Radek Mikula

Bakalářská práce
2005



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Institut řízení procesů a aplikované informatiky
akademický rok: 2004/2005

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Radek MIKULA**
Studijní program: **B 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Informační technologie**

Téma práce: **Simulace elektronických obvodů**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracujte literární rešerši zaměřenou na simulaci elektronických obvodů.**
- 2. Provedte průzkum nabízených simulačních programů pro elektroniku, při průzkumu se zaměřte na vhodnost jejich využití ve výuce a zároveň posuďte cenovou dostupnost nabízených programů.**
- 3. Podle možností porovnejte dva simulační programy a zhodnoťte jejich přínos pro výuku.**
- 4. Ve zvoleném simulačním programu vytvořte soubor příkladů, které budou demonstrovat základní elektrické jevy v analogové a číslicové technice.**

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. BURIAN, Z., KREJČÍŘÍK, A.: Simuluj. Praha, BEN, 2002
2. LÁNÍČEK, R.: Simulační programy pro elektroniku. Praha, BEN, 2002.
3. BIOLEK, D.: Řešíme elektronické obvody. Praha, BEN, 2004.
4. MYSLÍK, J.: Elektrické obvody. Praha, BEN, 1997.
5. LÁNÍČEK, R.: Elektronika. Praha, BEN, 1998.
6. <http://www.tina.com>
7. <http://www.electronicworkbench.com>
8. <http://www.spectrum-soft.com>
9. <http://www.cadware.cz>
10. <http://www.hw.cz>

Vedoucí bakalářské práce:

Mgr. Milan Adámek, Ph.D.

Institut řízení procesů a aplikované informatiky

Datum zadání bakalářské práce:

21. února 2005

Termín odevzdání bakalářské práce:

10. června 2005

Ve Zlíně dne 18. února 2005



prof. Ing. Josef Šimoník, CSc.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel institutu

Děkuji vedoucímu práce Mgr. Milanu Adámkovi, Ph.D. za odbornou pomoc a věcné připomínky při vedení bakalářské práce.

Abstrakt

abstrakt česky

Bakalářská práce se zabývá rozbořem a použitelností simulačních programů elektronických obvodů, které mají sloužit pro výuku základů elektroniky na středních případně vysokých školách.

Cílem práce je provést průzkum dostupných simulačních programů vhodných pro výuku s ohledem na jejich pořizovací cenu, snadnost ovládání, možnosti lokalizace do českého jazyka, funkčnosti a věrohodnosti prováděných simulací těchto aplikací.

V práci je proveden rozbor několika simulačních programů a zhodnocen jejich přínos a využitelnost ve výuce. Součástí práce je vytvoření souborů příkladů, které demonstrují možnosti vybraných programů při simulování základních elektrických jevů v analogové a číslicové technice.

abstrakt ve světovém jazyce

The theme of this final project is dealing with analysis and practical usage of electronic circuits' simulation programmes that should serve teaching of electronic basics at collages or polytechnics.

The aim of the work is to make a search of available simulation programmes suitable for education consideration for their purchasing price, user friendliness, the possibility of the Czech localization, functionality and credibility of simulations at these applications.

The project consists of several simulation program analysis and evaluation with aspect of contribution and usage for teaching. The part of the project is a sample of examples that should demonstrate the possibilities of selected programmes when simulate basic electric phenomena in analog and digital technology.

OBSAH

ÚVOD	7
I. TEORETICKÁ ČÁST	8
1 ANALÝZA ELETRICKÉHO OBVODU A JEJÍ MOŽNOSTI	9
1.1 MODELOVÁNÍ, ANALÝZA, SIMULACE	9
1.2 ANALÝZA JAKO ČINNOST	9
1.3 METODY ANALÝZY HEURISTICKÉ A ALGORITMICKÉ	12
1.4 DĚLENÍ METOD ANALÝZY PODLE CHARAKTERU MODELU	13
1.5 ANALYZAČNÍ METODY V SIMULAČNÍM PROGRAMU	14
1.6 ZVLÁDÁNÍ SIMULAČNÍCH PROGRAMŮ STUDENTY	16
II. PRAKTICKÁ ČÁST	23
2 SIMULAČNÍ PROGRAMY	24
2.1 SPICE	24
2.1.1 Historie	24
2.1.2 Netlist obvodu	25
2.2 SNAP	28
2.2.1 Možnosti programu	28
2.2.2 Koncepce programu	28
2.2.3 Výsledky	31
2.3 MICROCAP	32
2.4 MULTISIM	36
2.4.1 Multisim - Pro	37
2.4.2 Multisim - PowerPro	37
2.4.3 Školní verze	38
2.5 EDISON	39
2.6 TINA	42
2.6.1 TINALab II	43
3 KOMPARACE VYBRANÝCH PROGRAMŮ	46
3.1 SHRNUTÍ	48
4 UKÁZKOVÉ PŘÍKLADY	50
ZÁVĚR	62
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	63
SEZNAM OBRÁZKŮ	65
SEZNAM PŘÍLOH	66

ÚVOD

Během patnácti let se osobní počítače rozšířily tak, že již jsou stejně dostupné jako dříve kalkulátory, avšak jejich přínos pro technickou praxi je mnohem větší. K efektivnímu využití počítačů je ovšem zapotřebí i kvalitní software a ten je zatím pro školství ještě v mnoha případech zcela nedostupný. Legálním řešením je používání freeware a demoverze ostrých verzí programů.

Simulační programy, které využívají výkonnost soudobých počítačů, otevírají dříve nevídané možnosti pro analýzu a simulaci dějů složitých elektronických obvodů. Výsledkem historického vývoje, který započal zhruba v padesátých letech minulého století, jsou programy určené pro simulaci analogových obvodů („analogové simulátory“) a pro simulaci digitálních obvodů na logické úrovni („digitální simulátory“), popřípadě programy pro smíšenou simulaci obvodů, kterých je dnes k dispozici celá řada.

Bakalářská práce bude popisovat funkci několika vybraných „simulátorů“, které byly vybírány tak, aby byly použitelné při výuce základních elektrických jevů analogových a číslicových obvodů.

Úvodní část pojedná o problematice analýzy elektrického obvodu, o modelování, analýzy a simulace z hlediska teoretického

V další části budou srovnány a popsány základní vlastnosti jednotlivých simulátorů, zhodnocena jejich použitelnost a vhodnost zařazení do výuky, srovnání jejich parametrů a cenové dostupnosti.

Cílem práce je tedy po analýze programů zhodnotit v současnosti dostupné aplikace na trhu a vybrat či doporučit ty aplikace, které jsou nejvhodnější pro využití při prvotním seznámení s aplikačními programy, popřípadě s demonstrací základních elektrických jevů při výuce elektrotechnických předmětů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ANALÝZA ELETRICKÉHO OBVODU A JEJÍ MOŽNOSTI

1.1 Modelování, analýza, simulace

- **Modelování** je proces popisování reality omezenými prostředky, které máme k dispozici.

Výsledkem je model originálního objektu.

- **Analýza** je jednorázová činnost, kdy zkoumáním modelu se pokoušíme zjistit určitou vlastnost originálu.
- **Simulace** je činnost, kdy **analýzou** modelu se pokoušíme o získání co nejvěrnějšího obrazu chování originálu za přesně stanovených podmínek.

Při řešení obvodu pomocí „papíru, tužky a kalkulačky“ nejprve sestavíme model obvodu ve formě schématu zapojení včetně parametrů, resp. charakteristik jednotlivých součástek. Z tohoto modelu pak vzniká model matematický ve formě rovnic, které vyplývají z vzájemného propojení a vlastností součástek, Kirchhoffových zákonů a Ohmova zákona. Tento model pak podrobíme numerické analýze. Při řešení pomocí počítačového programu opět sestavujeme model obvodu, většinou pomocí schématického editoru, počítač je však schopen při tomto sestavování účinně pomáhat tím, že je zdrojem složitých interních modelů součástek (tranzistory, operační zesilovače, integrované obvody...). Vlastní sestavení rovnic, jejich řešení a vizualizace výsledků je již plně v režii daného programu.

Programy pro řešení obvodů se někdy dělí na **analyzační** (analýzátory) a **simulační** (simulátory). Na rozdíl od simulátorů, které jsou schopny realizovat různorodou škálu různých typů analýz s využíváním složitých modelů zakomponovaných do knihoven prvků, analýzátory jsou programy specializované jen na určité typy analýz s jednoduchými modely. Hranice mezi analyzačními a simulačními programy je neostrá. Dnes mají tvůrci většiny takovýchto programů tendenci hovořit o simulátorech.

1.2 Analýza jako činnost

Analýza modelu jakožto činnost má své cíle, vstupy a výstupy, metodu, formu, prostředky realizace. Významy vyjmenovaných atributů budou zřejmé z následujících příkladů.

Příklad: Je dán model Wheatstoneova mostu, tvořený čtveřicí rezistorů R_1 , R_2 , R_3 a R_4 , ideálním stejnosměrným napájecím zdrojem o vnitřním napětí U_i a nulovým indikátorem o

nekonečném vnitřním odporu. Cílem analýzy je stanovení napětí na indikátoru. Vstupem analýzy je model obvodu ve formě elektrického schématu s číselnými parametry součástek a cíl analýzy, tj. požadavek na výsledek. Výstupem analýzy je číselná hodnota napětí na indikátoru včetně polarity. Použitá metoda může být např. metoda postupného zjednodušování za pomoci „ekvivalence hvězda-trojúhelník“, metoda smyčkových proudů apod. Forma analýzy závisí na řešiteli, např. sestaví základní rovnice podle schématu, dosadí numerické hodnoty a rovnice vyřeší pomocí programovatelného kalkulátoru. Prostředky realizace analýzy jsou pak psací potřeby a kalkulátor.

Kromě výpočetních cílů může mít analýza i cíle jiné, např. vyučující jí může přiřadit cíle pedagogické (procvičení konkrétní metody analýzy, snaha o pochopení určitého děje v obvodu, co nejrychlejší získání určitého výsledku apod.). K základním pedagogickým cílům při výuce analýzy mnohdy patří:

1. Podporovat tvůrčí způsob myšlení studentů během analýzy elektrického obvodu s využitím základních zákonů (Ohmův zákon, Kirchhoffovy zákony) a principů (princip superpozice, ekvivalence,...). Analýza by měla přispívat k lepšímu chápání funkce obvodu. Student by měl mít v ideálním případě „elektrikářský cit“ na to, zda rozložení napětí a proudů je reálné či nikoliv, a jak z dosud získaných dílčích výsledků získat další.
2. Zvládnout účinný nástroj – algoritmickou metodu analýzy k „ručnímu“ řešení relativně jednoduchých obvodů.
3. Porozumět principům moderních metod analýzy obvodů, implementovaných v běžně používaných analyzačních a simulačních programech (předpoklad jejich efektivnějšího využívání).

Zatímco na středních školách je asi reálné důsledně naplňovat pouze první z cílů, na elektrotechnických fakultách je nutné zvládnout všechny tři. Nicméně fenomén analyzačních a simulačních programů pro elektrotechniku nerozlišuje hranice mezi stupni škol a vstupuje do výukového procesu i zde. V závislosti na způsobu výuky může být využívání těchto programů na školách i kontraproduktivní. Počítačová analýza a simulace obvodů je na elektrotechnických fakultách vnímána jako součást komplexního procesu počítačem podporovaných řešení inženýrských problémů. Tento se dnes odehrává zejména v následujících rovinách:

1. Využívání speciálního programového vybavení. V případě elektrotechnických návrhů jsou typickými představiteli simulátory obvodů (PSPICE, MicroCap, TINA (EDISON), Electronics Workbench apod.).
2. Využívání univerzálních programů pro vědeckotechnické výpočty jako jsou MATLAB+SIMULINK, MATHCAD, MAPLE, MATEMATIKA apod.
3. Využívání vyššího programovacího jazyka.

Ve všech případech je možné postupy, jakkoliv mohou být formálně různorodé, shrnout takto: Fyzikální jev je vyjádřen matematickým modelem, který je následně vyhodnocen počítačem pomocí numerických nebo symbolických metod. Při práci v rovině 1 není uživatel nucen – pokud nevzniká problém – se o tyto metody blíže zajímat, v rovině 2 již stojí před problémem volby vestavěných algoritmů, a v rovině 3 již mnohdy vytváří své vlastní algoritmy. Na první pohled by se tedy zdálo, že zatímco řešení složité numerické úlohy v C++ vyžaduje velmi dobré zvládnutí použitých numerických metod, pro práci se simulačním programem SPICE nepotřebujeme o zabudovaných algoritmech vědět vůbec nic. Každodenní zkušenosti z využívání simulačního softwaru na počítačových učebnách však naopak naznačují existenci vážného problému: uživatel často nad programem ztrácí kontrolu, protože není jeho tvůrcem a nerozumí tudíž základním mechanismům jeho fungování. Není-li současně schopen předvídat reálný výsledek simulace, pak akceptuje simulační výstupy i tehdy, jsou-li tyto v rozporu s realitou například v důsledku nevhodně nastavených globálních nebo lokálních podmínek simulace. Často je student zmaten, proč simulátor není schopen nalézt řešení v stanoveném počtu iterací, a náhodně mění nastavení různých položek, dokud není „nějaké“ řešení nalezeno. Přitom by stačilo, kdyby student znal vlastnosti prakticky používaných iteračních metod, chybových kritérií a tomu odpovídajících globálních parametrů simulátoru. K tristním situacím dochází, nabízí-li program volbu jedné z vestavěných metod řešení (např. metodu integrace diferenciálních rovnic) a uživatel z absence znalostí ponechává implicitní nastavení se všemi možnými negativními důsledky. Požadavky na zvládnutí standardně používaných numerických metod samozřejmě rostou, pracujeme-li v rovinách 2 nebo dokonce 3. Dosažení pedagogického cíle č. 3 je tedy - důsledně vzato - podmíněno zvládnutím specifických partií vysokoškolské numerické matematiky.

1.3 Metody analýzy heuristické a algoritmické

Metodu analýzy můžeme chápat jako konkrétní postup od modelu obvodu až po získání cíle analýzy. Všechny existující metody analýzy můžeme rozdělit na **nealgoritmické (heuristické)** a **algoritmické**. Do první kategorie patří postupy, které řešitel volí na základě svých předchozích zkušeností s využíváním tvůrčího přístupu. Například při výpočtu napětí na výstupu zatíženého děliče napětí je možno nejprve sloučením zatěžovacího a pracovního rezistoru převést řešení na problém děliče nezatíženého, posléze vypočítat proud děličem a následně výstupní napětí. Jiným možným postupem je využití Théveninovy věty apod. Algoritmická metoda oproti tomu definuje přesný postup – algoritmus, který vždy vede k cíli. Výše uvedená úloha zatíženého děliče může být řešena například algoritmickou metodou smyčkových proudů.

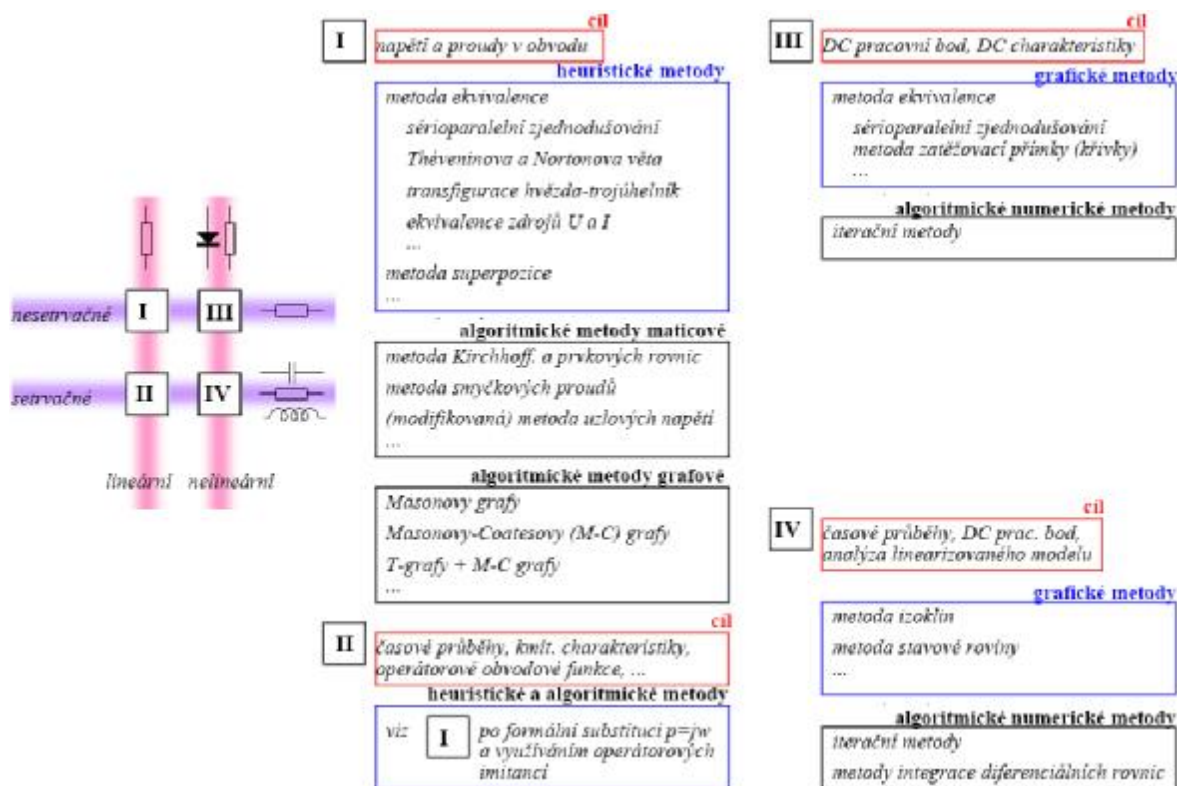
V první fázi studia elektrotechniky je žádoucí vést studenta k tomu, aby přistupoval k analyzační úloze tvořivě za pomoci znalosti Ohmova zákona, Kirchhoffových zákonů a základních principů teoretické elektrotechniky. Pedagogický cíl č 1 je tedy třeba naplňovat pomocí nealgoritmických metod již v úvodních elektrotechnických předmětech. Současně je však třeba připravovat půdu i pro výuku algoritmických metod, které hrají zásadní roli při naplňování cílů č. 2 a 3. Studentům, kteří nejsou vybaveni potřebnou dávkou tvůrčího myšlení, tyto metody více vyhovují. Při úspěšném pochopení podstaty algoritmu pak jeho aplikace vždy vede k cíli. Zde se však objevuje otázka "nebezpečnosti" algoritmu ve smyslu odtržení procesu řešení od fyzikální podstaty problému: student dokáže obvod vyřešit, ale nerozumí jeho funkci. Jednou z cest, jak tento nedostatek eliminovat, je vnášení prvků tvořivosti do algoritmické metody.

Jestliže je však student seznámen jak s nealgoritmickými, tak i algoritmickými metodami, stává se otázka "nebezpečnosti" algoritmu méně významnou. Pak namísto vyhraněných úvah, zda vyučovat metody jedné nebo druhé skupiny se objevuje výhodnější alternativa jejich kombinování a vzájemného doplňování. Každá z metod pak v dané symbióze plní svou funkci: nealgoritmická nutí k fyzikálnímu myšlení, algoritmická pak poskytuje účinný nástroj k praktickému řešení.

1.4 Dělení metod analýzy podle charakteru modelu

Z hlediska modelu jakožto objektu analýzy je obvyklé dělit metody analýzy na dvě velké skupiny: na metody pro lineární a nelineární obvody. Další prolínající rovinou klasifikace je dělení na metody pro neseťvačné (odporové) a seťvačné (obsahující i akumulační prvky) obvody. Vznikají tak čtyři základní kombinace a příslušné metody je pak možné rozčlenit do skupin **I** až **IV** podle Obr. 1. Metody se pak většinou vyučují postupně od těch nejjednodušších: Začne se od analýzy lineárních odporových obvodů (I), kdy vystačíme se soustavou lineárních algebraických rovnic. Heuristické metody vyjmenované na Obr. 1 se pak stávají významnou náplní středoškolské výuky a výuky v základních předmětech na vysoké škole. Pak jsou na řadě lineární seťvačné obvody (II), popsatelné soustavou lineárních algebraicko-diferenciálních rovnic. V závislosti na cílech analýzy je v tomto případě matematickým modelem buď soustava algebraických rovnic obsahujících komplexní kmitočet $j\omega$ (analýza harmonických ustálených stavů pomocí fázorů), nebo soustava rovnic s Laplaceovým operátorem p (analýza jednodušších přechodných dějů, přenosových funkcí a kmitočtových charakteristik Laplaceovou transformací), nebo soustava původních lineárních algebraicko-diferenciálních rovnic (obecná analýza chování obvodu v čase při daném budicím signálu a daných počátečních podmínkách). K metodám analýzy lineárních obvodů se řadí i analyzační postupy využívající teorie linearizovaných dvojbranů. U nelineárních odporových obvodů (III), které lze modelovat soustavou nelineárních algebraických rovnic, se v minulosti s oblibou vyučovaly grafické metody analýzy. V současnosti jsou dobrou metodickou pomůckou učitele k vysvětlení funkce (např. metoda zatěžovací přímky u tranzistorového zesilovače), nikoliv však výkonnou analyzační pomůckou – tou se stal simulační program. Poslední skupinou metod jsou metody pro analýzu nelineárních seťvačných obvodů (IV), což jsou modely většiny prakticky využívaných elektronických systémů. Vnitřní děje jsou popsány soustavou nelineárních algebraicko-diferenciálních rovnic. Od grafických metod řešení (metoda izoklin, metoda fázového prostoru atd.), které dnes plní nanejvýš funkci výkladovou, se plně přešlo k počítačovému řešení. Svou roli hrají i algoritmické metody v skupině I. Například metoda smyčkových proudů a uzlových napětí je v učebních osnovách řady středních škol. Modifikovaná metoda uzlových napětí je výborným nástrojem pro rychlou orientační analýzu lineárních a linearizovaných obvodů obsahujících moderní aktivní prvky jako jsou různé typy operačních zesilovačů, proudových konvektorů apod. Vyučuje se na některých

elektrofakultách. Velký význam má tato metoda v souvislosti s její implementací ve většině komerčních simulačních programech. Je tedy výhodné této metodě porozumět, je to jeden z předpokladů efektivního využívání simulátorů. Pro rychlé „ruční“ řešení lineárních obvodů, jakož i pro snadnější chápání jejich funkce, je velmi výhodné osvojit si metody grafů signálových toků. Jedná se o grafickou interpretaci soustavy lineárních rovnic. Populárně řečeno, na laika působí grafové metody řešení velmi efektně: na základě schématu obvodu se nakreslí „jakési grafické symboly“ a z nich se přímo napíše výsledek analýzy (tento postup se nazývá vyhodnocení grafu).



Obr. 1 Dělení obvodů na lineární, nelineární, nesetřvačné a setřvačné

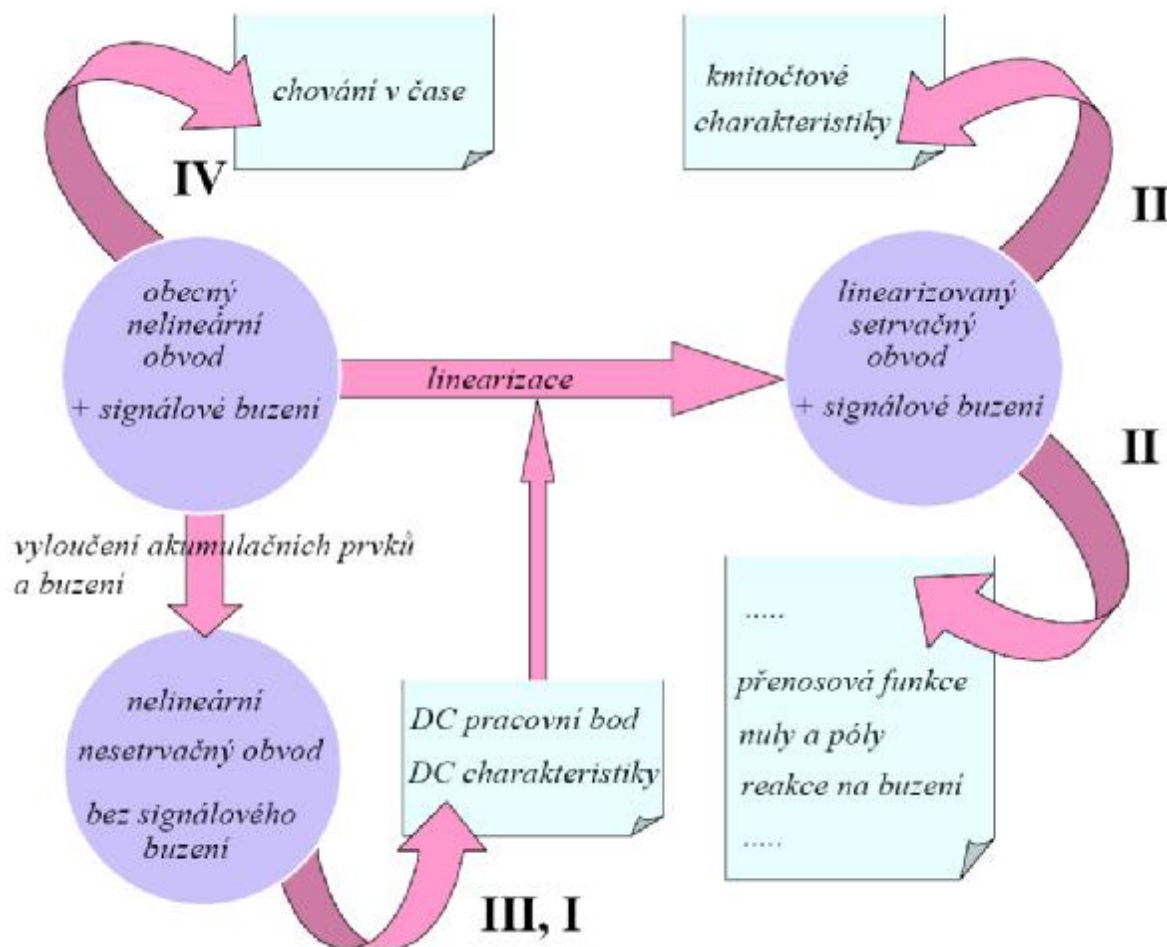
1.5 Analyzační metody v simulačním programu

Z hlediska logiky výše uvedené klasifikace lze často v učebních osnovách vypořádat závažnou didaktickou chybu, kdy jsou bez předběžného vysvětlení probírány linearizované parametry obecně nelineárních prvků (zejména tranzistorů), mechanicky jsou používány symboly p a $j\omega$ apod. Je zcela nutné, aby výkladu konkrétního analyzačního nástroje předcházela orientovanost studenta, v jakém bodě „klasifikačního stromu obvodů“ se nachází. Vlastním kapitolám věnovaným analýze by tedy mělo předcházet poučení, že prakticky všechny obvody jsou nelineární (co to znamená), co je to stejnosměrný pracovní

bod a jaké jsou podmínky „lineárního“ chování obvodu v okolí tohoto pracovního bodu. Z toho pak vyplývá i fyzikální význam linearizovaného modelu a jeho parametrů.

Zcela odlišné metody analýzy je třeba použít k nalezení pracovního bodu, k výpočtu odezvy obvodu na relativně slabé střídavé buzení, a k určení reakce obvodu na signál, který jej udržuje v silně nelineárním režimu. Příslušné znázornění je na Obr. 2. Základem většiny analýz je nalezení **stejnoseměrného pracovního bodu** (DC Operating Point) nelineárního obvodu. Stejnoseměrným pracovním bodem rozumíme množinu stejnosměrných napětí ve všech uzlech a stejnosměrných proudů všemi větvemi obvodu v ustáleném stavu, k němuž dojde po napojení obvodu na stejnosměrné napájecí zdroje. Přitom případné střídavé signálové zdroje jsou vyřazeny z činnosti, tj. jsou nahrazeny jejich stejnosměrnými složkami (většinou nulovými). Dále simulátor vyřadí z obvodu všechny akumulací prvky, které nemají na stejnosměrný pracovní bod vliv. Vznikne model nesetřvačného nelineárního obvodu bez signálového buzení, který je popsán soustavou nelineárních algebraických rovnic. Ta je řešena numerickou iterační metodou.

Při analýze **statických charakteristik** (DC Analysis), jako jsou např. ampérovoltové charakteristiky diod, nelineární charakteristiky tranzistorů, napěťové převodní charakteristiky číslicových obvodů apod. je třeba opakovat výpočet stejnosměrného pracovního bodu pro různé velikosti příslušných stejnosměrných budících zdrojů. V simulátorech bývá tento režim označován jako DC analýza, která patří k nejnáročnějším numerickým úlohám.



Obr. 2 Kompletní analýza nelineárního obvodu postupnou analýzou jeho dílčích modelů

Je-li cílem analýzy **kmitočtová charakteristika** obvodu (AC Analysis), sestaví simulátor nejprve linearizovaný model obvodu, tj. provede linearizaci charakteristik v okolí daného pracovního bodu. Některé programy, např. SNAP (pracuje na symbolickém principu), dokáže z linearizovaného modelu určovat další jeho atributy, například přenosové funkce v operátorovém tvaru a její póly, což je vhodné k testování stability obvodu.

Nad nelineárním setrvačným modelem obvodu se často provádí tzv. **časová analýza** (Transient Analysis), tj. řešení odezev obvodu na různé budicí signály. Jádrem časové analýzy v simulátoru bývá algoritmus numerické integrace nelineárních diferenciálních rovnic obvodu.

1.6 Zvládání simulačních programů studenty

Prakticky před každou analýzou se musí uživatel simulačního programu rozhodnout pro určité nastavení parametrů simulace, které program nabízí. Jsou to zejména položky, rozhodující o tom, zda počítat stejnosměrný pracovní bod a jaké zvolit počáteční podmínky

simulace. Uživatel neznalý věci raději ponechá implicitní nastavení těchto položek. Musí pak ovšem počítat s tím, že v některých situacích obdrží jiný výsledek simulace, než jaký požaduje. Ve výhodě jsou zde ti uživatelé, kteří správně porozuměli pojmům „pracovní bod“ a „počáteční podmínka“ a zhruba vědí, jaký je postup simulátoru při řešení.

Další problémy vznikají při řešení určitých úloh, kdy simulace vede na různá chybová hlášení, spojená s numerickými problémy (nelze nalézt řešení v daném počtu iterací, příliš malý krok řešení apod.). Obvykle to znamená „sáhnout“ do globálních parametrů simulátoru, což je však již relativně kvalifikovaná činnost, podmíněná mj. dobrou znalostí principů výpočetní metody implementované v simulátoru.

Zatímco druhou skupinu problémů není průměrný student schopen samostatně řešit, zvládnutí problémů z první skupiny je zcela v jeho moci. Je ovšem třeba, aby zvládl následující teoretické poznatky:

1. *Simulátor sestavuje rovnice obvodu na základě modifikované metody uzlových napětí. Neznámými veličinami, které počítá, jsou napětí mezi jednotlivými uzly a tzv. referenčním uzlem, který je označen značkou uzemnění, a proudy induktory.*

Znamená to, že i když počítáme například jen jedno z napětí, které nás zajímá, program ve skutečnosti řeší celou soustavu rovnic jako takovou – k dispozici jsou všechny neznámé.

2. *Reakce obvodu na daný budicí signál závisí nejen na tomto signálu, ale i na tzv. počátečních podmínkách, v nichž se obvod nacházel v okamžiku připojení budicího signálu. Například průběh nabíjení kapacitoru, který připojíme k baterii o daném vnitřním odporu, závisí na tom, na jaké napětí byl kapacitor nabit v okamžiku připojení. Simulátor rozumí pod pojmem **počáteční podmínky** množinu všech neznámých, tj. uzlových napětí a proudů induktory – v počátečním okamžiku simulace.*

Tyto počáteční podmínky bývají implicitně nastaveny na nulu. Implicitní nastavení nelze použít, hodláme-li např. zkoumat vybíjení kapacitoru, k němuž je paralelně připojen rezistor, ze zadaného počátečního napětí. Na druhou stranu je toto nastavení vhodné např. ke studiu nasazování kmitů v oscilátoru, nikoliv však k sledování ustálených kmitů.

Z výše uvedeného vyplývá jednoduchý závěr: kdybychom v libovolném okamžiku přerušili časovou analýzu, pak neznámé (vypočítané) veličiny tvoří vektor počátečních podmínek pro

další simulaci. Z časového vývoje počátečních podmínek lze odvodit všechny existující signály v obvodu.

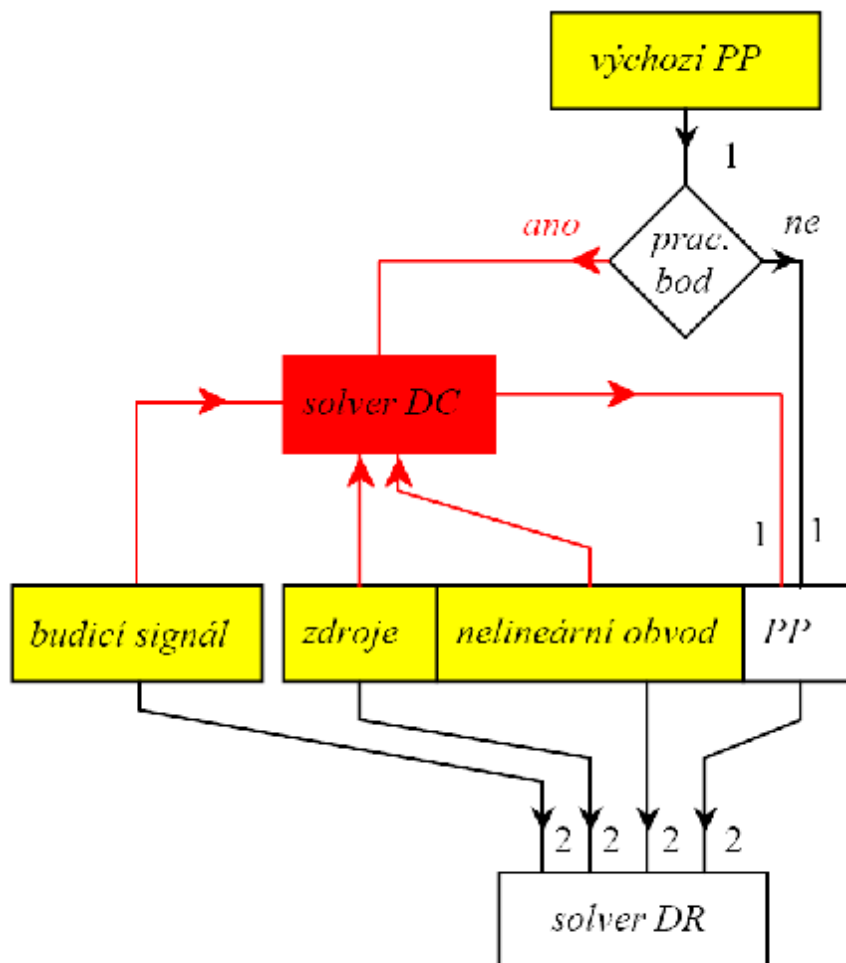
3. *Připojíme-li obvod k stejnosměrným napájecím zdrojům, pak po odeznění přechodných dějů obvod „naběhne“ do stejnosměrného ustáleného stavu. Neznámé (vypočítané) veličiny simulátoru by pak odpovídaly stejnosměrnému pracovnímu bodu. Nelineární obvod může vykazovat několik pracovních bodů. Ke kterému z nich program „zkonverguje“, závisí na počátečních podmínkách simulace.*

Je zde tedy možnost počítat stejnosměrný pracovní bod prostřednictvím časové analýzy přechodných dějů po připojení obvodu ke zdrojům. Této možnosti se však využívá jen výjimečně, a to tehdy, selže-li interně zabudovaná metoda hledání pracovních bodů.

4. *Stejnoscsměrný pracovní bod je hledán analýzou nelineárního nesetřvačného modelu, tj. řešením soustavy nelineárních algebraických rovnic. Jediné univerzální řešení představuje použití iteračních metod (konkrétně je to modifikovaná Newtonova-Raphsonova iterační metoda). Po proběhnutí každé iterace je srovnán výsledek řešení s výsledkem v předchozím kroku. Pokud se již výsledky neliší v mezích určité chyby, která je přednastavena v globálních podmínkách simulátoru, výpočet je ukončen a obsah proměnných je prohlášen za souřadnice pracovního bodu. Počáteční podmínky simulace zde fungují jako iterační „násada“ (první odhad řešení). Volbou „násady“ se můžeme pokusit ovlivnit, který z existujících pracovních bodů bude nalezen.*

Na Obr. 3 je zjednodušené znázornění interních mechanismů, které působí v simulátoru při časové (transientní) analýze. Význam zkratk a označení: PP jsou počáteční podmínky; solver DC je jednotka řešení stejnosměrného pracovního bodu iteračním řešením soustavy nelineárních algebraických rovnic; solver DR je jednotka výpočtu časových odezev numerickou integrací soustavy diferenciálních rovnic.

V obrázku jsou žlutou barvou vyznačeny bloky, reprezentující vstupy simulace: vlastní nelineární obvod spolu s napájecími a signálovými zdroji a výchozí počáteční podmínky (implicitně nastavené jako nulové). V první fázi simulace se naplní vektor počátečních podmínek, v druhé fázi se vstupní data využijí k vlastnímu numerickému řešení časových průběhů v solveru diferenciálních rovnic.



Obr. 3 Zjednodušené schéma mechanismu časové analýzy v simulačním programu

Způsob naplnění vektoru počátečních podmínek závisí na tom, je-li povolen výpočet pracovního bodu (implicitně je povolen). Jednoduché je to při nepovolení: pak se výchozí počáteční podmínky překopírují do vektoru PP. Je-li vyžadován výpočet pracovního bodu, použijí se výchozí počáteční podmínky jako „násada“ pro iterativní řešení v solveru DC (červeně označené části). Solver si z modelu obvodu „vypůjčí“ jeho rezistivní část, budicí signály nahradí jejich stejnosměrnými složkami, případně počátečními hodnotami, a provede řešení. Nalezený pracovní bod se pak překopíruje do vektoru počátečních podmínek a stává se počátečním bodem, od něhož se odvíjí řešení časových průběhů.

Výše popsanou strukturu řešení musíme respektovat při volbě strategie simulace konkrétních obvodů. Problematiku demonstrujeme na konkrétních příkladech.

Příklad 1. Jednostupňový tranzistorový zesilovač ve třídě A, vstupní signál je harmonický o kmitočtu 1kHz.

a) Nulové počáteční podmínky, výpočet pracovního bodu ANO.

Výsledkem časové analýzy je přechodný jev, který by nastal, kdybychom v čase $t = 0$ začali zesilovač, který již má v tomto okamžiku nastavený stejnosměrný pracovní bod, budít vstupním signálem.

b) Nulové počáteční podmínky, výpočet pracovního bodu NE.

Výsledkem časové analýzy je složitý přechodný jev, který by nastal, kdybychom v čase $t=0$ začali zesilovač, jehož všechna vnitřní napětí i proudy jsou vynulovány, budít vstupním signálem, a v tomtéž okamžiku kdybychom připojili zesilovač k napájecímu zdroji. Oproti bodu a) je zde simulován i náběh zesilovače do stejnosměrného pracovního bodu.

c) Konkrétní počáteční podmínky, výpočet pracovního bodu ANO.

Výsledek je obdobný jako v bodu a) s tím rozdílem, že v důsledku volby jiných počátečních podmínek může simulátor nalézt jiný stejnosměrný pracovní bod.

d) Konkrétní počáteční podmínky, výpočet pracovního bodu NE.

Výsledkem časové analýzy je složitý přechodný jev, který by nastal, kdybychom v čase $t = 0$ začali zesilovač, jehož vnitřní napětí a proudy mají definované velikosti, budít vstupním signálem, a v tomtéž okamžiku kdybychom připojili zesilovač k napájecímu zdroji.

Simulátor MicroCap umožňuje nastavení počátečních podmínek do režimu LEAVE. Po proběhnutí analýzy pak dojde k zápisu posledního výsledku analýzy do vektoru počátečních podmínek (konečný stav se stává výchozím stavem pro další případnou analýzu). Provádíme-li v tomto režimu analýzu opakovaně, můžeme simulovat postupné ustalování odezvy. To ale platí za předpokladu, obsahuje-li časový interval simulace celistvý počet period budicího signálu.

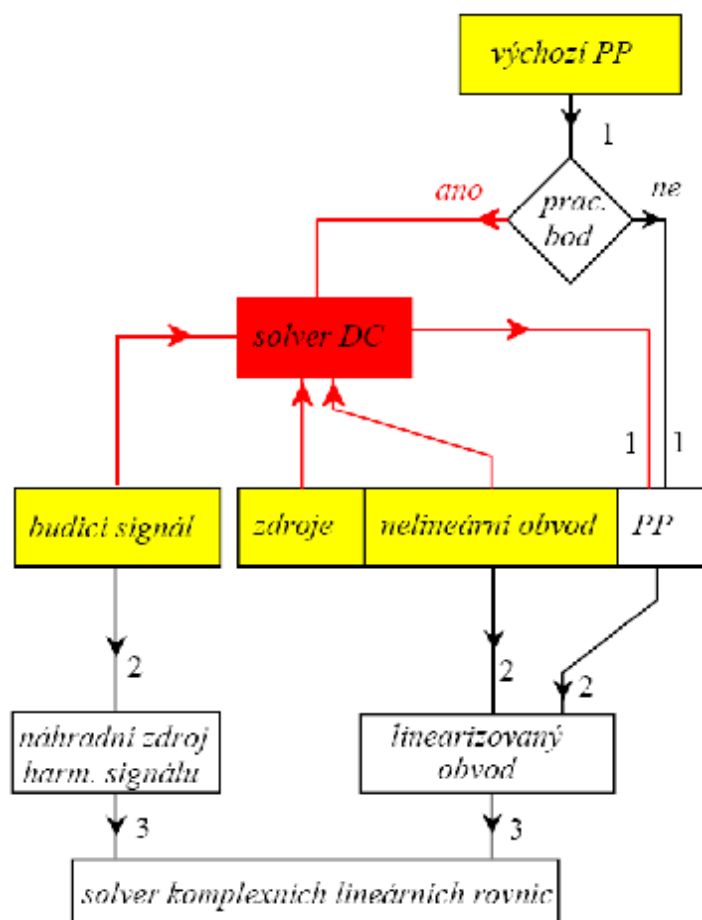
Příklad 2. Colpittsův oscilátor.

a) Nulové nebo jiné konkrétní počáteční podmínky, výpočet pracovního bodu ANO.

Simulátor se snaží nalézt stejnosměrný pracovní bod, přičemž vychází z prvního odhadu – zadaných počátečních podmínek. Vzhledem k povaze obvodu (na mezi stability, stejnosměrný ustálený stav není zaručen) nemusí být pracovní bod nalezen a pro uživatele ani není zajímavý. Analýza v tomto režimu nemá smysl.

b) Nulové počáteční podmínky, výpočet pracovního bodu NE.

Výsledkem simulace je náběh oscilátoru do provozního režimu z nulového výchozího stavu bezprostředně po připojení obvodu k napájecímu zdroji. V režimu LEAVE pak lze studovat postupný přechod oscilátoru do periodického ustáleného stavu.



Obr. 4 Zjednodušené schéma mechanismu kmitočtové analýzy v simulačním programu

Na Obr. 4 je zjednodušené znázornění interních mechanismů, které působí v simulátoru při kmitočtové (AC) analýze. V první fázi simulace se tak jako u časové analýzy naplní vektor počátečních podmínek, v druhé fázi se sestaví linearizovaný model obvodu a budicí signál se

nahradí zdrojem harmonického signálu, v třetí fázi dojde k řešení linearizovaného obvodu pro zadaný rozsah kmitočtů. Pokud je povolen výpočet pracovního bodu (implicitní nastavení), dojde k linearizaci obvodu kolem pracovního bodu, který je nalezen. V opačném případě se linearizace provede v okolí specifikované počáteční podmínky. Této možnosti využije běžný uživatel jen výjimečně.

Závěry

Metody analýzy elektrických obvodů by měly plnit nejen funkci nástroje pro řešení, ale učitel jich může využívat i k výkladovým účelům. Je ukázáno, že k správnému používání počítačových programů pro simulaci obvodů je ze strany uživatele nutná alespoň minimální teoretická průprava, spočívající v porozumění pojmů jako jsou nelineární a lineární obvod, stejnosměrný pracovní bod, linearizovaný model, počáteční podmínky, přechodný děj, ustálený stav, kmitočtová charakteristika apod.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

2 SIMULAČNÍ PROGRAMY

Programů pro simulaci obvodů je celá řada a většina z nich je založena na SPICE algoritmech. Vlastnosti a hlavně ceny jednotlivých simulačních programů se značně liší. Následující popis se bude zabývat popisem těch produktů, které jsou zejména vhodné pro použití při výuce na středních a vysokých školách. Dalším důležitým kritériem pro výběr produktu byla i cena a dostupnost dokumentace a vzorových příkladů.

2.1 SPICE

2.1.1 Historie

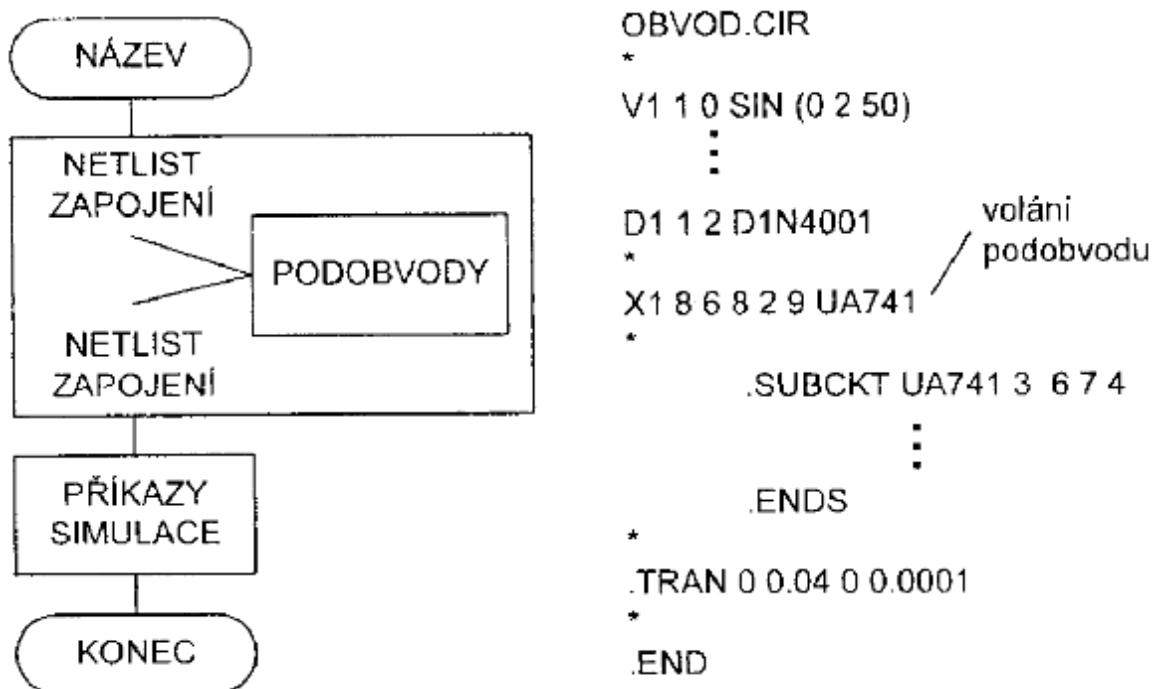
SPICE – Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis byly vyvinuty na univerzitě v Berkley v roce 1972. Postupně vznikaly různé verze těchto algoritmů, přičemž v současnosti se nejvíce využívá verze SPICE 3F5. Vývoj simulačních algoritmů financovala vláda USA, a proto byly tyto algoritmy uvolněny k bezplatnému využívání. To způsobilo značné rozšíření těchto algoritmů, a lze je proto považovat za standard. Způsob práce se SPICE připomíná klasické programování s textovým zápisem obvodu. To s sebou sice přináší značné možnosti, ale na druhou stranu vyžaduje detailní znalost příkazů a preciznost při zadávání obvodů. U rozsáhlejších zapojení s velkým počtem uzlů je riziko chyby v zadání značně velké. Proto byly vyvinuty preprocesory, které předvádějí grafické schéma obvodu do textového zápisu tzv. netlistu obvodu. Po proběhnutí vlastní simulace jsou u komerčních programů k dispozici rozsáhlé nástroje (postprocesory) pro vizualizaci výsledků simulace (grafy) a další zpracování dat.

Preprocesor, simulační jádro a postprocesor tvoří dohromady komerční simulační program. Tyto programy se liší snadností obsluhy, rychlostí simulace, funkcemi pro zpracování výsledků, rozsahem knihoven a také cenou. Podstatnou část ceny přitom může tvořit databáze modelů elektronických prvků. Není výjimkou, že dodatečné rozšíření knihoven může stát téměř tolik, co celý program. Neexistuje přitom žádný program, který by vynikal ve všech parametrech.

2.1.2 Netlist obvodu

Jak už bylo uvedeno, není zapotřebí u programů netlist obvodu zadávat v textovém režimu a u většiny programů jej ani uživatel nevidí. Stačí, když zakreslí schéma obvodu, a převod proběhne automaticky před vlastním spuštěním simulace. Pro konkrétní grafické schéma zapojení lze textový netlist snadno získat například v demoverzi programu MicroCap.

Netlist začíná názvem obvodu, který nelze vynechat. Řádek uvozený hvězdičkou se považuje za komentář a zde prázdné řádky zpřehledňují zápis. Pokud řádek začíná znaménkem plus, chápe se jako pokračování předchozího řádku. Vlastní simulace vychází z metody uzlových napětí, a proto je nutné definovat prvky mezi jednotlivými uzly. Výsadní postavení má referenční bod (zem), který se označuje vždy nulou. Ostatní uzly programy automaticky číslovají podle postupu při kreslení obvodu. V řadě programů je možné těmto uzlům přiřazovat i názvy Obr. 5.



Obr. 5 Struktura netlistu SPICE

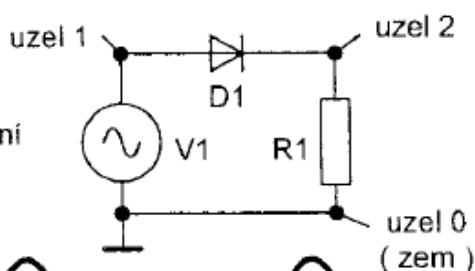
Obvodový prvek je popsán svým názvem, polohou mezi uzly, parametry součástky a u složitějších prvků odkazem na model součástky. Protože v zapojení může být několik součástek stejných, např. odporů, musí se buď lišit jmény (RLOAD, RZATEZ), a nebo pořadovými čísly (R1, R2).

Nejjednodušším prvkem v zapojení na Obr. 6 je odpor R1, který je zapojen mezi uzel 2 a společnou zem 0. Jeho hodnotu určuje poslední cifra, tj. 100Ω . V případě potřeby je i u odporu možné přidat další parametry. Napěťový zdroj V1 zapojený mezi první uzel a zem má v závorce definován nulový stejnosměrný posuv, amplitudu sinusovky dva volty a kmitočet 50Hz.

JEDNOCESTNY_USMERNOVAC

```
*
V1 1 0 SIN(0 2 50)
R1 2 0 100
D1 1 2 D1N4001
*
```

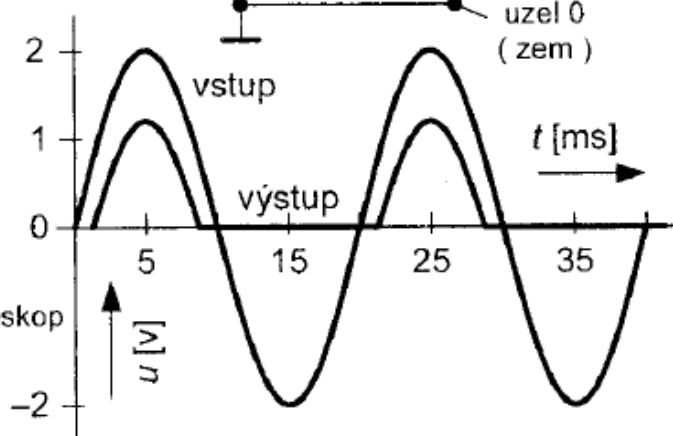
schéma zapojení



```
.MODEL D1N4001 D
+ (IS=1.10065P
+ N=1.14668 BV=500
+ RS=158.398M
+ TT=4.76089N CJO=50.3997P
+ VJ=408.893M M=386.137M)
*
```

```
.TRAN 0.8m 40m 0 0.1m
.PLOT TRAN V(2) V(1) -2,2
*
.END
```

osciloskop



Obr. 6 Jednocestný usměrňovač

Popis diody D1 zapojené z uzlu 1 do uzlu 2 je složitější, a odkazuje se proto na společný model D1N4001. Tento model může využívat více stejných diod v zapojení a zápis modelu je pak v netlistu pouze jednou. Protože parametrů modelu diody může být až třicet, jsou tyto parametry nepovinné, a pokud se nedefinují, převzímou se přednastavené (default) hodnoty idealizované diody. Z toho vyplývá, že kvalita modelů se může u jednotlivých programů značně lišit a pro stejnou diodu 1N4001 můžeme v databázích jednotlivých programů najít odlišné modely. Zajímavé je, že odchylky nebývají jenom v počtu sledovaných parametrů, ale i v parametrech samotných. U modelu D1N4001 Obr. 6 jednocestného usměrňovače je upravena default hodnota saturačního proudu diodou IS, emisní koeficient diodové rovnice N, průrazné napětí BV, sériový odpor diody RS, zotavovací čas TT, kapacita přechodu CJO, potenciálové napětí VJ a gradační koeficient M. Vlastní simulace je spouštěna příkazy, které jsou uvozeny tečkou. Příkaz .TRAN spouští přechodovou analýzu, což si lze představit jako připojení osciloskopu do všech uzlů obvodu. Parametry uvedené za příkazem definují minimální krok simulace, čas

konce, čas počátku a nejmenší krok pro vykreslování grafu. Příkazy .PLOT zajistí vykreslení průběhů napětí ve zvolených uzlech obvodu. Každý netlist musí být ukončen příkazem .END.

```
C:\MC8DEMO\DATA\circuit10.CIR Transient Analysis
* Střední a speciální školy MESIT, o.p.s. Radek Mikula
* Převod ze souboru zdroje Micro Cap do PSPICE
*
D1 2 1 D1N3909
R1 1 0 100
V1 INTERIOR_NONE1 0 SIN (0 169.7 50 0 0 0)
RV1 2 INTERIOR_NONE1 0.001 ;added by V1
*
*** Fast Recovery Power Rectifier
.MODEL D1N3909 D (IS=5.35107P N=1.25229 BV=500 RS=4.10427M TT=5U
CJO=110.455P
+ VJ=1.03203 M=300.091M)
*
.OPTIONS ACCT LIST OPTS ABSTOL=1pA CHGTOL=.01pC DEFL=100u
DEFW=100u DIGDRVF=2
+ DIGDRVZ=20K DIGERRDEFAULT=20 DIGERRLIMIT=0 DIGFREQ=10GHz
DIGINITSTATE=0
+ DIGIOLVL=2 DIGMNTYMX=2 DIGMNTYSCALE=0.4 DIGOVRDRV=3
DIGTYMXSCALE=1.6 GMIN=1p
+ ITL1=100 ITL2=50 ITL4=10 PIVREL=1m PIVTOL=.1p RELTOL=1m TNOM=27
TRTOL=7 VNTOL=1u
+ WIDTH=80
*
.LIB "C:\MC8DEMO\library\NOM.LIB"
*
.TEMP 27
.TRAN 2e-008 1u 0
.PRINT TRAN V(1) V(2)
.PLOT TRAN V(1) V(2) -0.02,0.08
.PROBE
.END
```

Obr. 7 Netlis programu MicroCap

Pokud se použije pro získání netlistu program Microcap, přibudou další nepovinné řádky Obr. 7. Názvem obvodu je jméno souboru na disku. Příkaz .OPTIONS slouží k počátečnímu nastavení simulátoru, příkaz .LIB odkazuje na knihovnu modelů polovodičových prvků a .PROBE spouští prostprocesor pro zpracování a vizualizaci simulovaných hodnot. Praktická je i přidaná rozpiska součástek a automaticky vložené datum a čas vytvoření netlistu. Nicméně i předchozí mnohem jednodušší netlist vytvoří při simulaci stejný výsledek, takže je možné řadu řádků v netlistu vypustit.

2.2 SNAP

2.2.1 Možnosti programu

SNAP (Symbolický nástroj pro analýzu počítačem) je program pro symbolickou, semisymbolickou a numerickou analýzu linearizovaných obvodů. Symbolická analýza umožňuje získat hledanou obvodovou funkci (přenos, impedance) jako vzorec obsahující symboly součástek a Laplaceův operátor s . Semisymbolický tvar výsledku je získán ze symbolického dosazením numerických hodnot parametrů obvodových prvků, čímž získáme číselné hodnoty koeficientů polynomů v čitateli a jmenovateli obvodové funkce. Ze semisymbolického tvaru jsou dále získány nulové body a póly, vzorce pro impulsní a přechodnou odezvu a grafy těchto odezev, jakož i grafy kmitočtových závislostí obvodových funkcí. Program umožňuje počítat i všechny používané dvojbranové parametry dvojbranu ekvivalentního analyzovanému obvodu a citlivosti obvodových funkcí na libovolný parametr, vše v symbolické, semisymbolické i numerické formě.

Množinu obvodových součástek a jejich modelů lze uživatelsky snadno modifikovat a rozšiřovat pouhou editací dvou textových souborů, které jsou doplňkem programu SNAP.

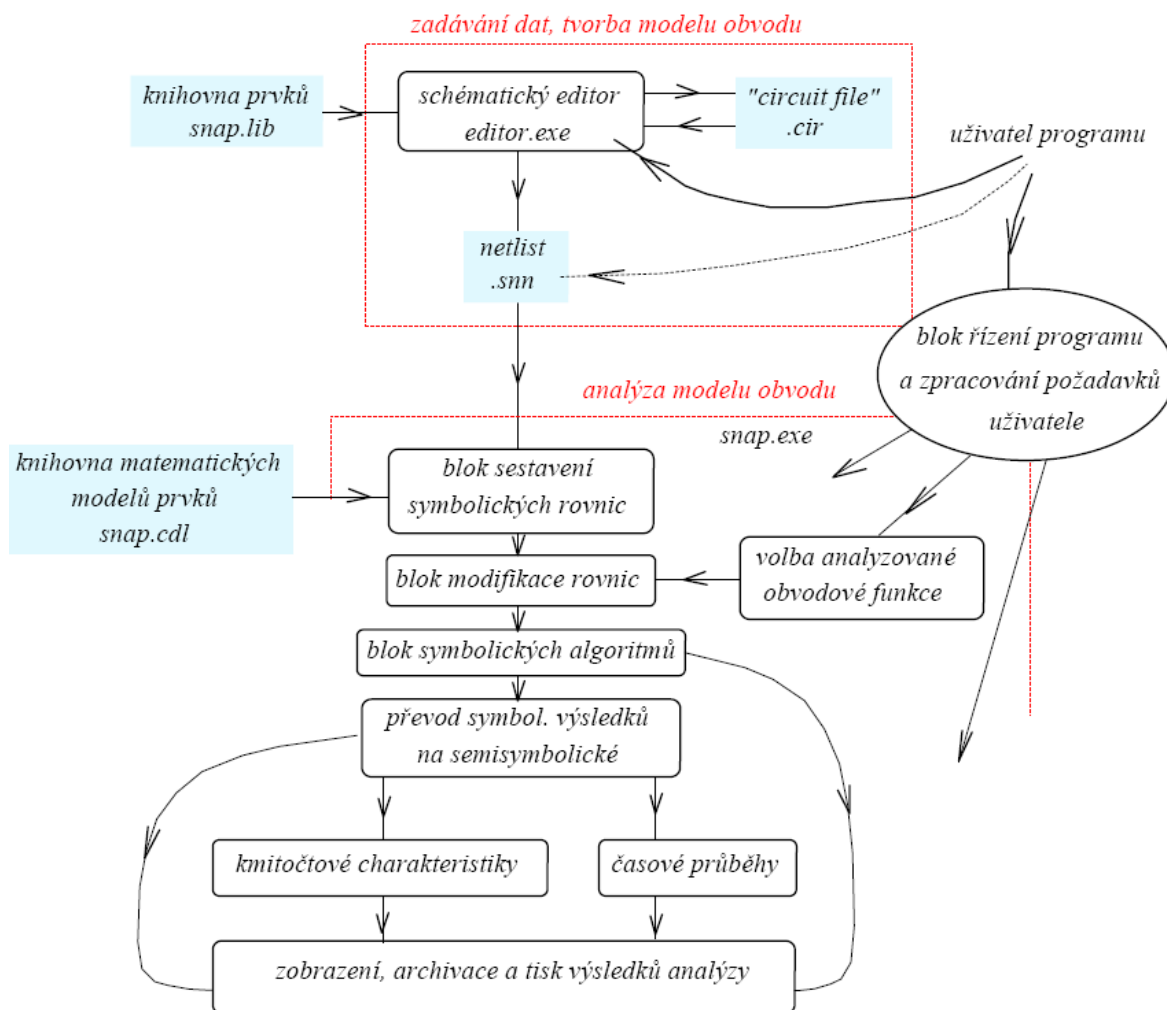
V programu SNAP je implementována maticová metoda analýzy. Základem je modifikovaná zobecněná metoda uzlových napětí. Hledané obvodové funkce se určují pomocí algebraických doplňků. Použitá implementace využívá speciální techniku pro úspornou reprezentaci matice. Pro urychlení výpočtu byl klasický algoritmus rozvoje determinantu modifikován s využitím teorie grafů. Implementovaná metoda má díky tomu minimální nároky na velikost paměti během rozvoje determinantu a symbolická analýza probíhá velmi rychle.

2.2.2 Koncepce programu

Schéma je nejprve vytvořeno v schématickém editoru a zde konvertováno do snap netlistu (soubor s příponou .snn). Poté je spuštěn vlastní program SNAP, který načte data z netlistu a provede příslušný druh analýzy.

K programu SNAP je standardně dodáván schématický editor EDITOR.EXE. Je však možné použít libovolný jiný editor, jehož výstupem je netlist ve standardním formátu SPICE. Program EDITOR.EXE k své činnosti využívá textový ascii soubor SNAP.LIB,

v němž jsou speciálním jazykem definovány schématické značky elektrických prvků editoru a množina jejich zadávaných parametrů. Úpravou tohoto souboru lze rozšiřovat množinu používaných prvků a modifikovat již prvky nadefinované. Podrobnější informace je možné nalézt v manuálu.



Obr. 8 Struktura simulačního programu SNAP

Pomocí programu EDITOR.EXE je možné uložit jeho aktuální konfiguraci. Pak se v aktuálním adresáři objeví konfigurační soubor EDITOR.INI. Při opětovném spuštění editoru dojde k automatickému načtení konfigurace.

Vytvořené schéma je možné uložit do souboru se standardní příponou .CIR.

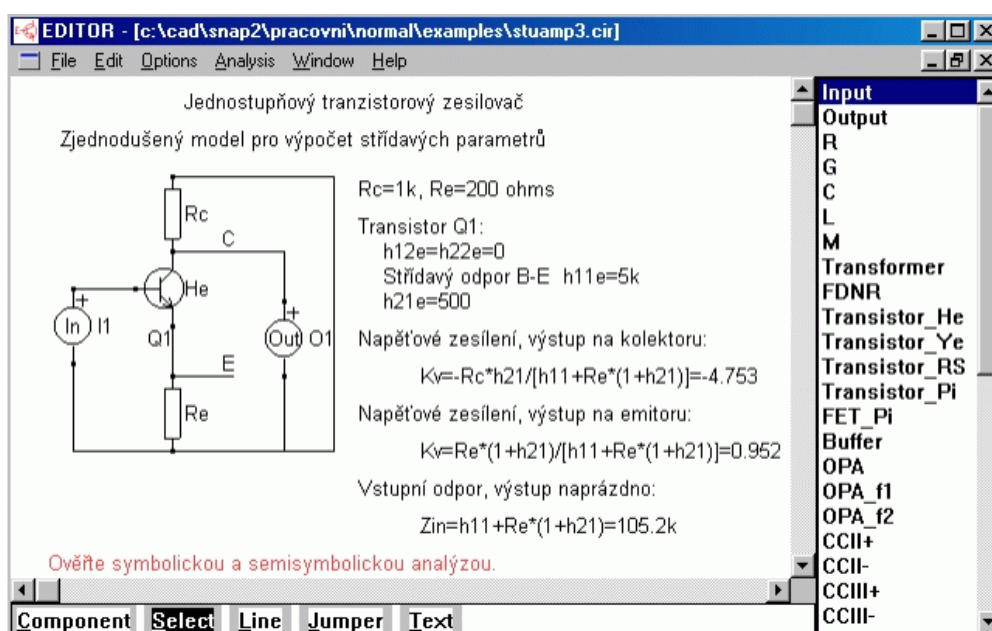
Program SNAP.EXE využívá pomocného textového ascii souboru SNAP.CDL. V tomto souboru jsou informace o matematických modelech prvků. Filozofie modelování je založena na modifikované metodě uzlových napětí. Informace v souboru snap.cdl souvisejí se

způsobem definice prvků v souboru SNAP.LIB. Uživatel tak má možnost neomezeně rozšiřovat analyzační možnosti snapu pouhou editací dvou textových souborů.

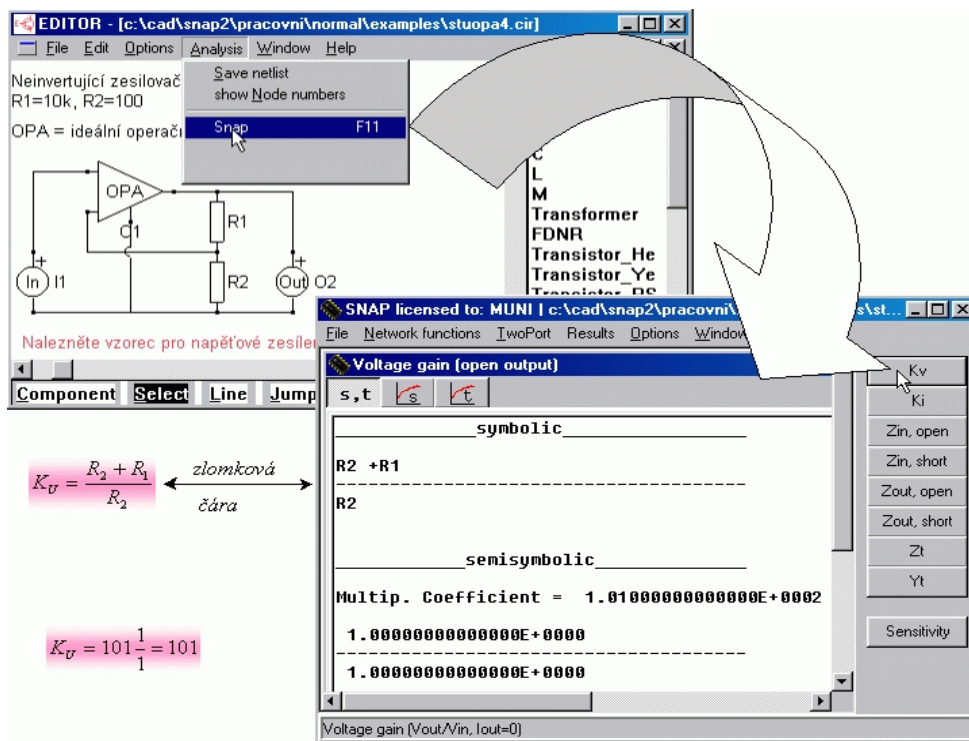
K plnohodnotné práci s programem SNAP je zapotřebí těchto souborů (měly by být v jednom adresáři): EDITOR.EXE, SNAP.LIB, SNAP.EXE, SNAP.CDL, SNAP.HLP.

V případě, že použijeme ke generaci netlistu jiný schématický editor, musíme soubory EDITOR.EXE a SNAP.LIB nahradit jinými potřebnými soubory. Činnost programu EDITOR.EXE nemusí probíhat korektně, obsahuje-li úplný název aktuálního adresáře diakritické znaky některé z národních abeced.

Úlohy připravené pro studium



Obr. 9 SNAP - jednostupňový tranzistorový zesilovač



Obr. 10 SNAP - neinvertující zesilovač

2.2.3 Výsledky

Pomocí tohoto menu mohou být výsledky analýzy exportovány do textového nebo grafického souboru, do schránky nebo přímo na tiskárnu. Taktéž je možný export do speciálních souborů pro další analýzu v prostředích Matlab, MathCad a Maple. Výstupy v grafických formátech jsou umožněny pouze v případě, je-li aktuálním oknem výsledků analýzy okno grafické.

Ulož jako text: Tato položka zpřístupní dialogové okno Uložit soubor pro ukládání obsahu aktuálního okna s výsledky analýzy do textového ascii souboru.

Ulož jako funkci Matlabu: Export do souboru pro další analýzu v Matlabu.

Ulož jako funkci MathCadu: Export do souboru pro další analýzu v MathCadu.

Ulož jako funkci Maple: Export do souboru pro další analýzu v Maple.

Tisk grafu: Výstup grafu z aktuálního okna na tiskárnu. Je možno použít i klávesovou zkratku Ctrl + P.

Kopírovat graf: Uloží graf z aktivního okna do schránky ve vektorovém formátu. Je možno použít i klávesovou zkratku Ctrl + C.

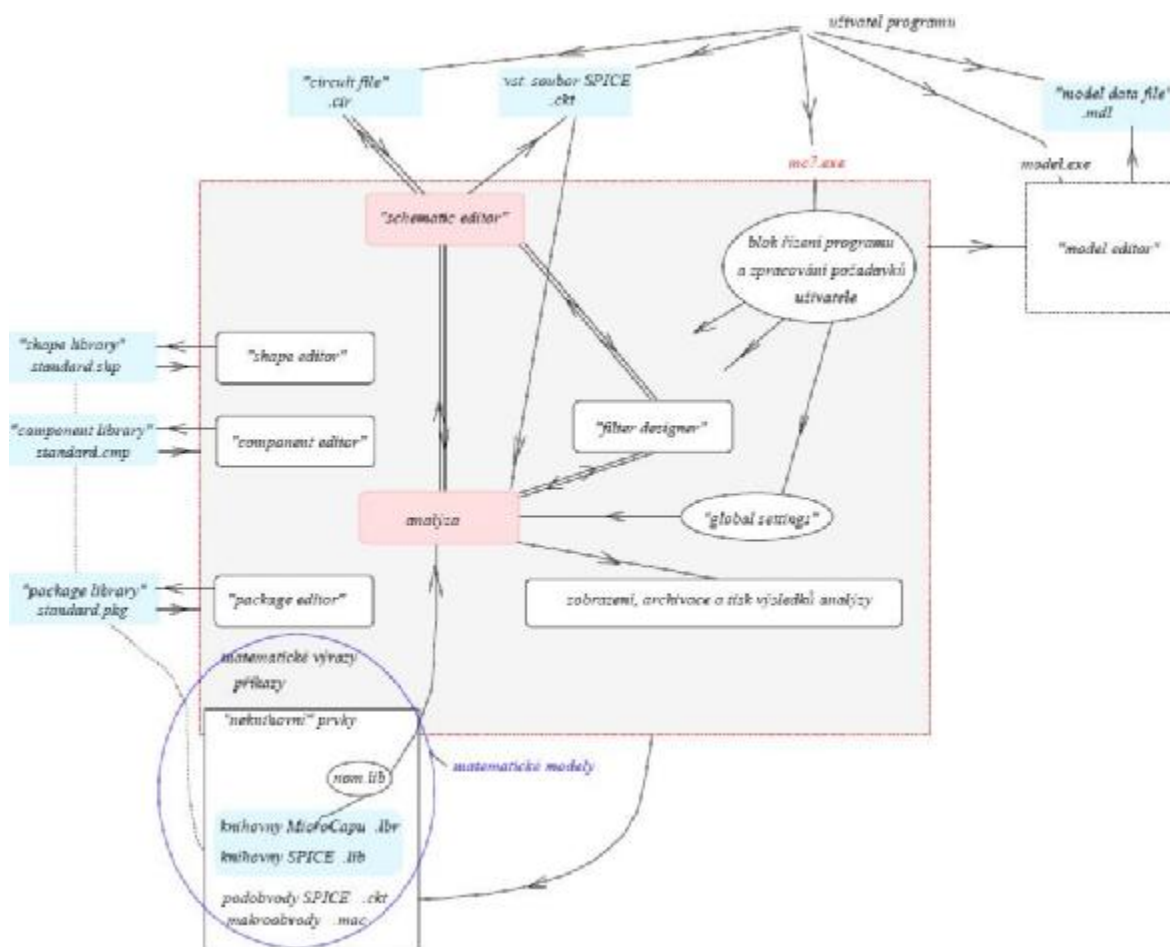
Ulož graf do souboru: Uloží graf z aktivního okna do souboru formátu windows metafile (*.wmf).

Uložit graf jako tabulku: Uloží body grafu do tabulky v ASCII formátu pro další zpracování v jiných programech (např. tabulkových procesorech).

2.3 MicroCap

Zjednodušené blokové schéma programu MicroCap (Obr. 11) jako představitele „numerických“ simulátorů. Všechny činnosti, známé ze SNAPu, a řadu dalších zde obstarává jediný spustitelný soubor MC8.EXE. Dalším programem je MODEL.EXE, který slouží k vytváření knihoven; matematických modelů součástek na základě jejich nejruznějších charakteristik, získaných reálným měřením.

Běžný uživatel využívá z MicroCapu bloky schematický editor, analýza, zobrazení, archivace a tisk výsledků. Kromě toho je do programu zakomponováno několik dalších relativně samostatných programů „Filter designer“ je nepříliš zdařilý program pro návrh kmitočtových filtrů. „Shape editor“ je program pro editaci stávajících a vytváření dalších schematických značek. „Component editor“ obhospodařuje databázi součástek a dává do souvislosti jejich schematické značky s jejich matematickými modely, které jsou začleněny buď přímo do simulátorů (tzv. „neknihovní“ prvky), nebo jsou uloženy v externích knihovnách. „Package editor“ je program, umožňující pracovat s knihovou patič jednotlivých součástek a generovat netlisty simulovaných obvodů pro programy na návrh plošných spojů, konkrétně pro Accel, OrCad, Protel a Pads.



Obr. 11 Zjednodušené blokové schéma programu MicroCap

Jednotlivé části programu jsou natolik provázány, že je někdy obtížné vymezit jejich hranice. Například schematický editor je provázán s blokem analýzy, který zpět do editoru vysílá data. Toto interaktivní pojetí analýzy pak umožňuje například zobrazení rozložení napětí, proudů, výkonů a dalších atributů jednotlivých součástek a sledování jejich bezprostředních změn při změnách v zapojení.

Schematický editor umožňuje práci v řadě „nových“ režimů. Při kreslení schématu vybíráme jednotlivé součástky z hierarchicky uspořádané databáze součástek, která je uložena v „component library“ – knihovně součástek. Na obrazovce se pak objeví příslušná schmeatická značka z „shape library“ – knihovny značek. Příslušné knihovny jsou poměrně rozsáhlé soubory s názvy standard.cmp a standard.shp. Je možné je modifikovat nebo přidávat další.

Aby nedošlo k nedorozumění, je třeba rozlišovat mezi právě zmíněnými knihovnami a knihovnami, v nichž jsou uložena data pro matematické modelování. Jde zejména o rozsáhlé knihovny, v nichž jsou uložena data pro matematické modelování. Jde zejména o rozsáhlé

knihovny polovodičových i jiných součástek s příponami .lbr a .lib. V binárních souborech *.lbr jsou uloženy „MicroCapovské“ modely součástek jejichž struktura je popsána v dokumentaci k programu. Soubory *.lib jsou snadno editovatelné ASCII soubory se SPICE modely součástek. Knihovny MicroCapu lze čas od času aktualizovat z www stránky programu <http://www.spectrum-soft.com/>. Rovněž je lze modifikovat z prostředí MicroCapu. Knihovny SPICE jsou v tomto směru ještě výhodnější. Lze je neomezeně rozšiřovat nebo přidávat nové knihovny pomocí textových souborů, které jsou většinou volně k dispozici na Internetu na stránkách výrobců integrovaných obvodů.

Knihovny součástek jsou značně rozsáhlé a jsou na disku uloženy v mnoha desítkách souborů. Mnohdy je zbytečné, abychom pracovali se všemi knihovnami. Proto existuje speciální textový soubor nom.lib. Je to jakýsi filtr mezi všemi knihovnami na disku a těmi knihovnami, které hodláme využívat. V souboru jsou uvedeny názvy těch knihoven, které budou po spuštění simulátoru k dispozici. Po vytvoření vlastní knihovny bychom tedy neměli opomenout její název přidat do souboru nom.lib. Během spuštění MicroCapu se načítá obsah tohoto souboru a v případě zjištění změny se modifikuje tzv. „index file“, který slouží programu k rychlému přístupu do všech aktuálních knihoven.

V seznamu modelů, které lze v prostředí schematického editoru používat, jsou dále tzv. podobvody SPICE a makroobvody. V obou případech se jedná o modely relativně samostatných obvodů, které jsou uloženy na disku a jsou využívány pro tvorbu jiných, složitějších obvodů. Podobvody SPICE mají své modely uloženy v ASCII souborech napsaných v jazyku SPICE, zatímco makroobvody jsou vytvořeny pomocí schematického editoru a uloženy do vstupních souborů („circuit files“) s příponou .mac. Makroobvody mohou (ale nemusí) mít definovanou sadu parametrů, které se konkretizují při použití daného makra v obvodu. Podobvody SPICE mohou být z principu rovněž volány s parametry, této možnosti se však v rámci MikroCapu nevyužívá. Makroobvody a podobvody SPICE jsou důležitým nástrojem k neomezenému rozšiřování analyzačních možností programu o modely dalších elektrických prvků. Zatímco makroobvody jsou „lokální“ záležitostí MicroCapu, podobvody SPICE tvoří důležitý nástroj modelování v simulátorech rodiny SPICE. Knihovny SPICE se v podstatě skládají z modelů jednotlivých podobvodů. Model podobvodu začíná příkazem .subckt a končí řetězem .ends. Většina světových výrobců polovodičových součástek poskytuje modely svých výrobků právě ve formě podobvodů.

Model obvodu můžeme, kromě klasického výběru součástek s jejich automatickým napojením na jejich matematické modely v knihovnách, dále obohacovat o matematické výrazy (například lze zapsat odpor rezistoru jako prakticky libovolnou funkci obvodových napětí nebo proudů) a příkazy, které se umísťují buď přímo na pracovní plochu schematického editoru nebo do speciálního textového pole.

Z Obr. 11 je zřejmé, že existují součástky, jejich modely nejsou uloženy v žádných knihovnách. Jedná se například o pasivní součástky R, L a C a další součástky s jedním nebo jen několika parametry a tudíž s velmi jednoduchým modelováním. Později však poznáme, že i těmto součástkám lze přidělit modely, které pak umožní rozšířit simulační možnosti například o toleranční nebo teplotní analýzu.

Výsledek zadávání modelu obvodu je možné podobně jako u SNAPu uložit do vstupního souboru. Tento soubor je zde textový a obsahuje řadu informací o obvodu, jako i o posledním stavu programu při jeho analýze. V zájmu dosažení lepší šířitelnosti souborů mezi uživateli, kteří mohou mít k dispozici různé knihovny součástek a jejich schematických značek, bylo dokonce přistoupeno k následujícímu opatření. Vstupní soubor obsahuje kopie schematických značek použitých součástek, jako i příslušná data z „Component library“. Domníváme-li se, že příjemce souboru nebude mít k dispozici ani matematický model součástky, lze jej do vstupního souboru včlenit příkazem „Refresh models“. Když program načítá vstupní soubor, obsahující součástku, která není uvedena v „Component Library“, přečte si schematickou značku a další data ze vstupního souboru a automaticky vytvoří přídatný soubor IMPORT.CMP jako rozšíření „component library“. Tím je obvod připraven k okamžité analýze bez toho, abychom kolegovi spolu se souborem .cir byli nuceni posílat i své další knihovny, jak to bylo nutné u předchozích verzí.

Kromě načítání dat ze vstupních souborů *.cir je možné analyzovat obvod na základě vstupních textových souborů, napsaných v jazyku SPICE. Prostředí MicroCapu umožňuje jak vytváření těchto souborů ve vlastním textovém editoru, tak i jejich import. Mnohdy je výhodné použít i další možnost, totiž převod schématu z „circuit file“ do vstupního souboru SPICE, s dalším využitím souboru pro jiné účely. Vstupní soubor SPICE totiž obsahuje netlist obvodu spolu s definicí toho, jak má vypadat analýza. Jednoduchou úpravou tohoto souboru pak můžeme zasahovat jak do modelu obvodu, tak i řídit jeho následnou simulaci.

Pro úplnost poznamenejme, že simulátory z rodiny SPICE mají na rozdíl od MicroCapu modulární strukturu. populární simulátory PSPICE jsou složeny ze tří základních bloků –

schematického editoru, vlastního simulátoru PSPICE a programu pro grafické zpracování výsledků analýzy PROBE. Součástí základního „balíku“ jsou i moduly PARTS (obdoba souboru MODEL u MicroCapu) a Stimulus Editor (grafické vytváření zdrojů signálů s komplikovaným časovým průběhem). Nepovinně je možné připojit další moduly. Mezi jednotlivými moduly jsou data předávána soubory s unifikovanou strukturou.

Ceny:

Micro - Cap 8, jednouživatelská i síťová verze (u síťové verze je zapotřebí koupě minimálně dvou licencí) **cca 100 000,-Kč/1 licenci**

Micro - Cap 8 Demo **zdarma** - omezené některé funkce

2.4 Multisim

Electronics Workbench - Multisim je elektronická laboratoř na počítači pro analogovou a digitální analýzu nakresleného elektronického obvodu. Program slouží pro vývoj elektronických zapojení i pro výuku ve školách. Jednoduché interaktivní ovládání, velké možnosti analýz a přitom relativně nízká cena je důvodem, proč je po celém světě více než 180 000 uživatelů tohoto programu.

Program umožňuje nakreslit schematické zapojení obvodu, ke kterému lze připojit přímo na obrazovce různé měřicí přístroje: voltmetry, ampérmetry, digitální multimetr, dvoukanálový osciloskop, 16-kanálový logický analyzátor, atd. Tyto přístroje jsou součástí programu a plně nahrazují skutečné přístroje. Program umožňuje provádět měření ve vybraných uzlech obvodu a průběhy měřených veličin zobrazit v grafické formě. Díky použitému principu měření umožňuje Multisim provádět simulaci na analogových i digitálních obvodech najednou - je to pravý simulátor smíšených obvodů.

Součástí programu je knihovna modelů součástek se všemi potřebnými parametry pro analýzu obvodů. K dispozici je několik tisíc modelů (to závisí na verzi programu). Většinu modelů součástek lze podle potřeby dále upravovat podle potřeby. Pomocí prvků již obsažených v knihovně programu lze vytvořit vlastní součástku ve formě pod-obvodu (sub-circuit), který lze uložit do knihovny. Obsah knihovny lze zvětšit dokoupením rozšiřujících knihovních sad.

Multisim plně využívá pro měření 32-bitového A/D simulátoru SPICE/XSPICE, případně je možné dokoupit moduly pro VHDL/Verilog. Tato skutečnost řadí Electronics Workbench mezi profesionální simulátory za neobyčejně nízkou cenu.

Návaznost na jiné programy je zajištěna prostřednictvím převodníků dat pro import a export SPICE netlistu a pro export netlistu nakresleného zapojení do některých návrhových systémů plošných spojů (Eagle, Orcad, ...), výsledky analýz je možné exportovat do programů Mathcad a Excel.

Program Multisim je nabízen ve dvou základních konfiguracích, které se vzájemně liší rozsahem knihoven součástek, prováděnými analýzami, dostupnými funkcemi a cenou:

2.4.1 Multisim - Pro

Vyšší verze programu, obsahuje všechno z verze Personal plus další doplňky

- do knihovny součástek přidáno další 6 000 modelů součástek (celkem 12 000),
- knihovnu součástek lze prohledávat, můžeme vygenerovat rozpiskou použitých součástek,
- lze pojmenovat uzly obvodu a vývody,
- k dispozici máme celkem 9 měřících přístrojů, byl přidán analyzátor zkreslení,
- můžeme spustit celkem 15 analýz, byly přidány další analýzy (Parameter sweep, Temperature sweep, Pole Zero, Transfer Function, Worst Case, Monte Carlo, Trace Width),
- můžeme načítat schémata ve formátu PSPICE,
- můžeme současně otevřít více souborů,
- obsah knihovny lze rozšířit přikoupením až 4 000 modelů,

2.4.2 Multisim - PowerPro

Plná verze programu, obsahuje všechno z verze Professional plus další doplňky.

- do knihovny součástek přidáno další 4 000 modelů součástek (celkem 16 000),
- je možné vytvářet modely součástek a je vylepšeno vyhledávání v knihovně součástek,

- k dispozici máme celkem 11 měřících přístrojů, byly přidány spektrální analyzátor, analyzátor sítí,
- můžeme spustit celkem 19 analýz, byly přidány další analýzy (Batched analysis, Nested sweep, User defined analysis a RF),
- součástí programu jsou další moduly: Model Maker, Project/Team Design Kit, RF Design Kit,
- program umožňuje provádět Code Modeling,
- v programu je obsažen modul Post-Processor,
- tuto konfiguraci lze dále rozšířit dokoupením přídatného modulu MultiHDL – Verilog,

2.4.3 Školní verze

Program Multisim má také školní verzi, která se svými parametry nejvíce podobá verzi PowerPro:

- školní verze má omezenou knihovnou součástek a nemá přístupné některé funkce a analýzy,
- školní verze navíc dovoluje nastavit přístup k některým funkcím programu, které lze s výhodou uplatnit při výuce. Je možné nastavit pracovní prostředí programu, lze povolit/zakázat tisk, zobrazení hodnot součástek, zobrazení obsahu „podobvodu“, zobrazení vad součástek, přístup k analýzám atd., toto nastavení je chráněno heslem,
- ceny školních verzí klesají s počtem instalací.

Program Multisim má i síťovou verzi pro počet uživatelů dle potřeby.

Na program Multisim navazuje přímo i program **Ultiboard pro návrh desek plošných spojů**, takže schema, které se nakreslí v Multisimu, lze použít pro návrh DPS bez nutných úprav. Ultiboard je kompletní program pro návrh DPS. Automatické routování je zajištěno přes autorouter **Ultiroute** nebo přes autorouter Specctra.

Ceny:

Multisim Pro - 1 uživatel: 62 200.- Kč

Multisim PowerPro - 1 uživatel: 108 200.- Kč

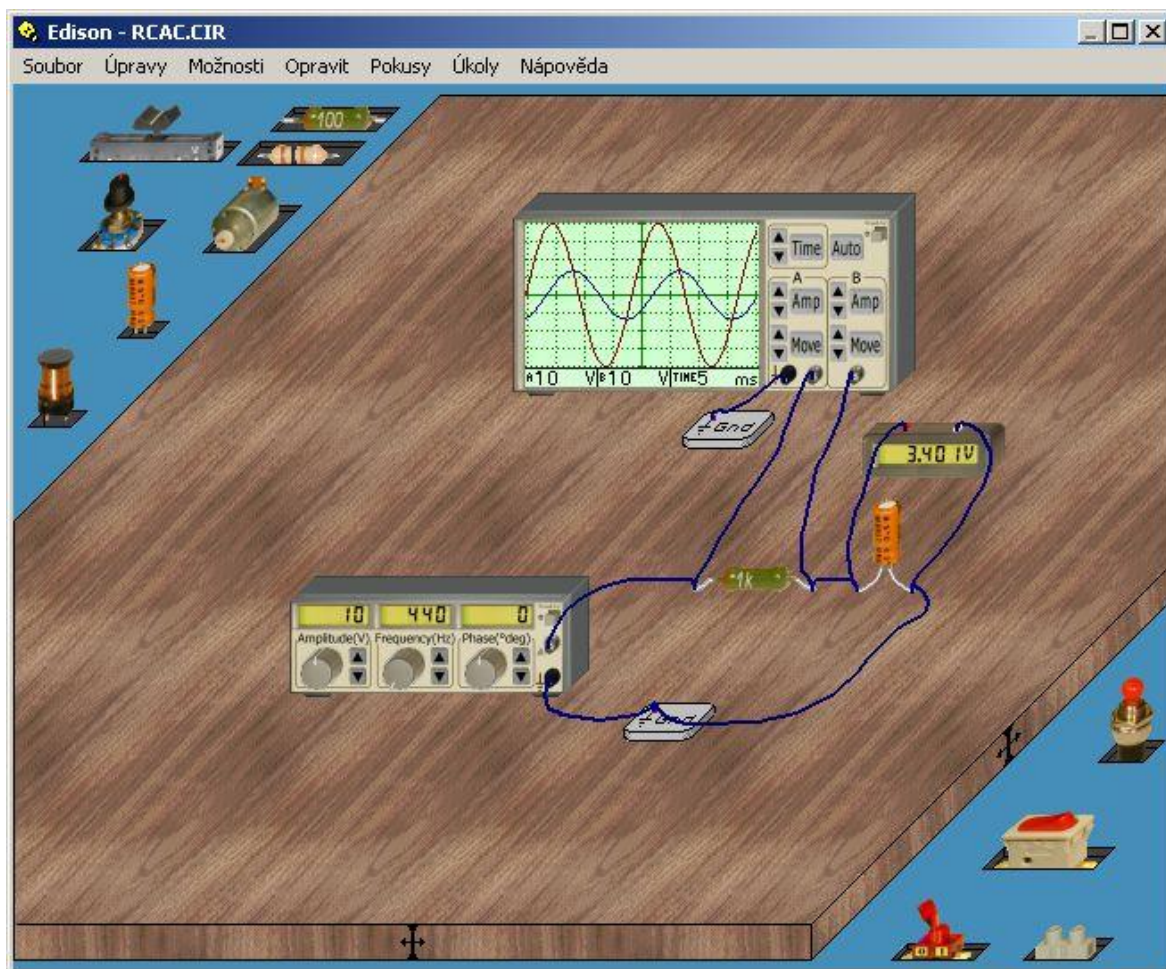
Multisim školní verze - 1 uživatel:	11 300.- Kč
Multisim školní verze - 10 uživatelů LAB:	59 300.- Kč
Multisim školní verze - 10 uživatelů NET:	74 100.- Kč
Multisim školní verze - 25 uživatelů LAB:	104 800.- Kč
Multisim školní verze - 25 uživatelů NET:	130 800.- Kč
Multisim Demo verze	zdarma - neumožňuje ukládání vytvořených obvodů, nesmí se používat pro účely výuky

2.5 Edison

Aplikace Edison 4 CZ je multimediální simulátor elektrotechnické laboratoře, který je vhodný pro demonstraci nejrozumnějších elektrických obvodů a v nich probíhajících jevů ve výuce fyziky, elektroniky a elektrotechniky. Edison 4 CZ umožňuje nejen interaktivní tvorbu virtuálních obvodů v 3D prostředí (Obr. 12), jejich testování či měření pomocí opět virtuálních přístrojů, ale i demonstraci předpřipravených pokusů a úloh, které lze velmi snadno a rychle modifikovat.

Více než stovka takovýchto pokusů a úloh je již připravena. Edison vhodně doplňuje využití reálných pokusů, jeho výhodou je větší variabilita, nízké náklady a možnost individuální práce žáků.

Prostředí aplikace Edison 4 CZ nabízí uživatelům při tvorbě obvodů virtuální součástky s realistickým vzhledem, propojovací panely a virtuální přístroje paralelně s automaticky vytvářeným schématem zapojení. K dispozici jsou například vypínač, přepínač, relé, baterie, napájecí zdroj, rezistor, potenciometr, žárovka, motor, kondenzátor, cívka, generátor signálu, osciloskop, diody, LED, bipolární a MOS tranzistory, logická hradla, klopné obvody, operační zesilovače a časovače, reproduktor či pojistka.

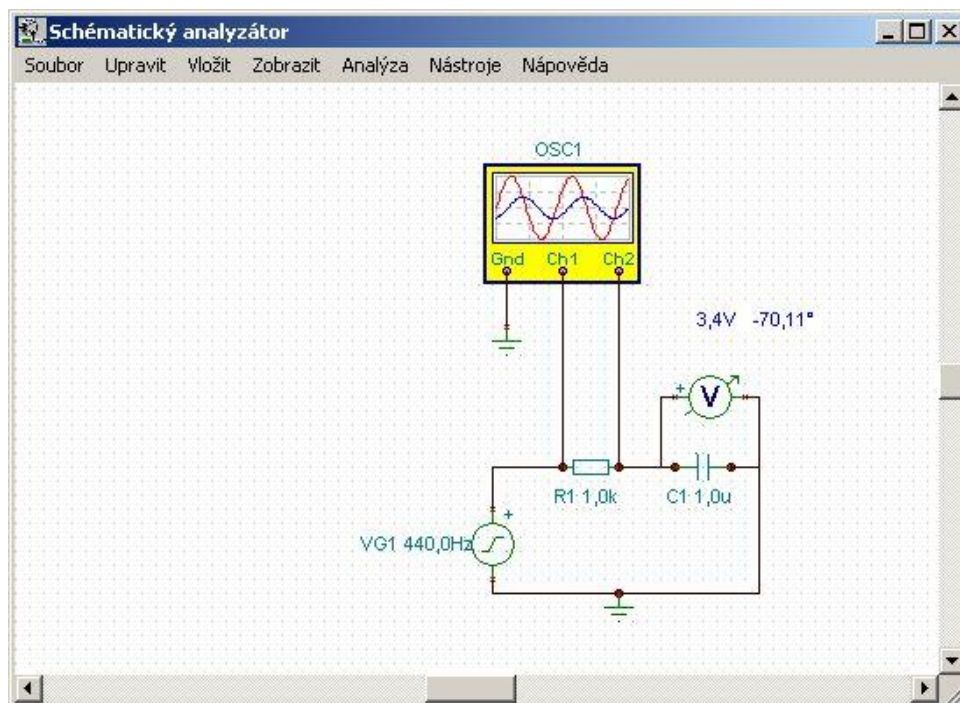


Obr. 12 Pracovní plocha aplikace EDISON

Pro složitější zapojení je k dispozici i rozvodný panel. Virtuální součástky, přístroje i vodiče se v prostředí programu Edison CZ „zapojují“ pouhým přetažením myši, zároveň se generuje ve schématickém analyzátoru schéma obvodu (

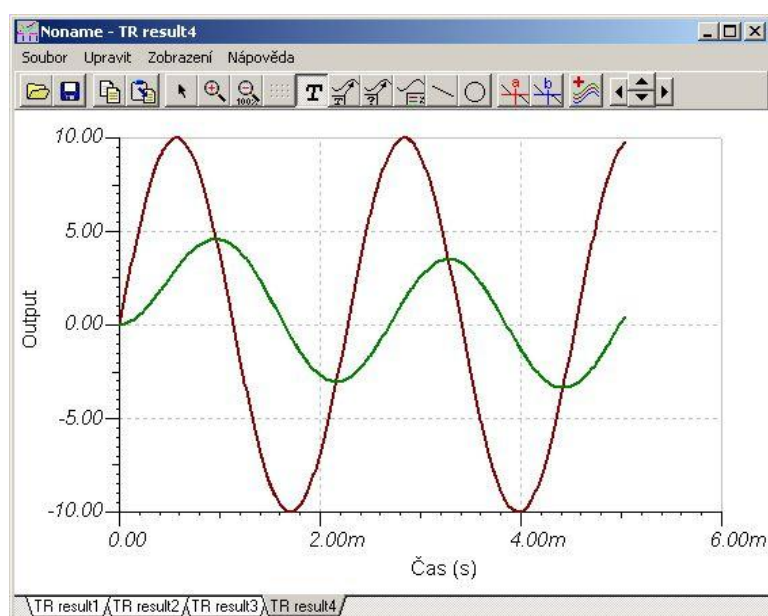
Obr. 13).

Edison lze velmi dobře použít jak v jednoduchých obvodech (jednoduchá zapojení se žárovkami a spínači, Ohmův zákon...), tak i ve složitějších zapojeních, kde můžete využít celou škálu dostupných komponent a sestavovat složitější obvody s polovodičovými součástkami a sledovat jejich chování. Jednou z unikátních možností je schopnost zobrazit v lineárních obvodech také charakteristiky Obr. 14 a odvodit matematický model Obr. 15.

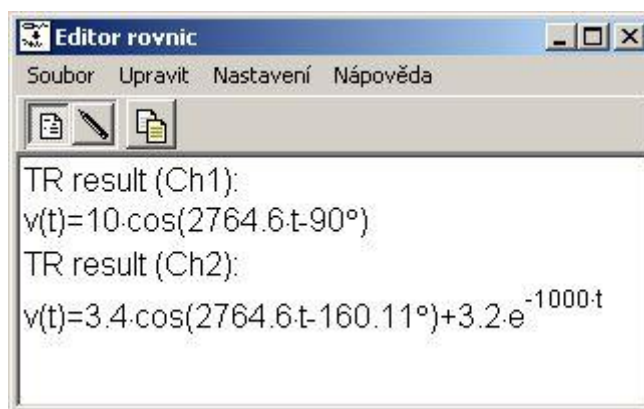


Obr. 13 Schématický analyzátor

Studenti se můžou například naučit jak využít Ohmův zákon, jak ovlivní filtr výstup obvodu v závislosti na frekvenci nebo jak se mění napětí na nabíjecím se kondenzátoru. Zde je potřeba připomenout, že Edison 4 CZ je podmnožinou dalšího, profesionálního, simulátoru elektrických a elektronických obvodů TINA Pro, který kromě jiného například obsahuje rozsáhlé knihovny s více než 20000 virtuálními modely skutečných součástek nebo přes 1200 řešených obvodů.



Obr. 14 Charakteristika



Obr. 15 Matematický model

Ceny:

Edison 4.0 CZ - 1 uživatel: 735.- Kč

Edison 4.0 CZ - školní multilicence: přibližně 8200.- Kč

Edison 4.0 Demo zdarma - neumožňuje ukládání vytvořených obvodů

2.6 Tina

Tina je výkonný programový balík pro návrh, simulaci a analýzu elektronických obvodů. Umožňuje simulaci analogových, digitálních i smíšených obvodů. Lze volit buď klasický způsob SPICE analýzy s grafickým zobrazením výsledků simulace a nebo je možné výsledky odečítat na panelech virtuálních měřících přístrojů. Je možné rovněž volit multimediální režim simulace (přepínání spínačů myši, naznačení svícení žárovek a LED diod).

Tento program je řešen podobně jako Multisim (Electronics Workbench). Demoverze je značně omezena, a pro vážnou práci se proto příliš nehodí. Omezení je totiž vztaženo nikoliv na počet součástek, ale na počet uzlů. Tím jsou automaticky vyřazeny všechny obvody s integrovanými obvody. I přes tento nedostatek si program z několika důvodů zaslouží vaši pozornost.

- K dispozici jsou neomezené knihovny součástek a je možné získat z nich potřebné parametry do jiných simulačních programů.
- Demoverze je doplněna 150 komentovanými příklady simulovaných zapojení, což je ideální studijní pramen pro práci se simulačními programy obecně.

- Je zabudován neomezený interpret¹ jazyka blízký Pascalu, takže získáte jednoduchou programovatelnou kalkulačku se solidním grafickým výstupem.
- Grafické výstupy programu jsou vektorové a lze je snadno přes schránku přenášet do jiných aplikací (OLE).
- Program disponuje unikátní symbolickou analýzou, takže jako výstup některých typů analýz získáte přímo analytický vztah a ne jen číselné vyjádření.

Pro účely výuky je k dispozici Exam Manager se dvěma režimy Selection a Advisor, pomocí kterých může v ostré verzi vyučující připravit problémové úlohy a program vyhodnocuje správnost odpovědí studenta. Oproti jiným programům je zde k dispozici symbolická analýza a interpret příkazů. Součástí demoverze je i řada řešených a okomentovaných zapojení, které lze použít jako vzor pro simulaci obecně.

Možnosti ostré verze simulačního programu Tina se dají částečně otestovat po nainstalování aplikace Edison, která je na programu Tina založena. Po instalaci aplikace je možné spustit i samotnou aplikaci Tina spuštěním programu TINA.EXE, aplikace Edison se spouští programem TINA.EXE s parametrem (TINA.EXE /Edison). V současné době připravuje firma Terasoft lokalizaci aplikace TINA do češtiny a chystá její uvedení na trh.

2.6.1 TINALab II

TINALab II - Vysokorychlostní multifunkční rozhraní k PC (Obr. 16). Obsahuje multimetr, osciloskop, spektrální analyzátor, logický analyzátor aj. pomocí kterých lze snadno přejít od simulace obvodů v počítači k reálným měřicím úlohám. Výsledky měření skutečných obvodů jsou zobrazovány na panelech měřicích přístrojů, které jsou totožné s virtuálními přístroji ze simulační části programu. Výsledky skutečného měření lze snadno porovnat s výsledky simulace téhož obvodu v počítači.

Parametry vysokorychlostního rozhraní TINALab II.

- Dvoukanálový paměťový osciloskop s rozlišením do 50MHz s 10/12 bitovým rozhraním,
- Funkční generátor (sinus, čtverec, rampa, trojúhelník a další libovolné vlnové křivky) do frekvence 4 MHz s maximální napětím 10V),

¹ Interpret umožňuje i jednoduché řešení soustavy u lineárních rovnic.

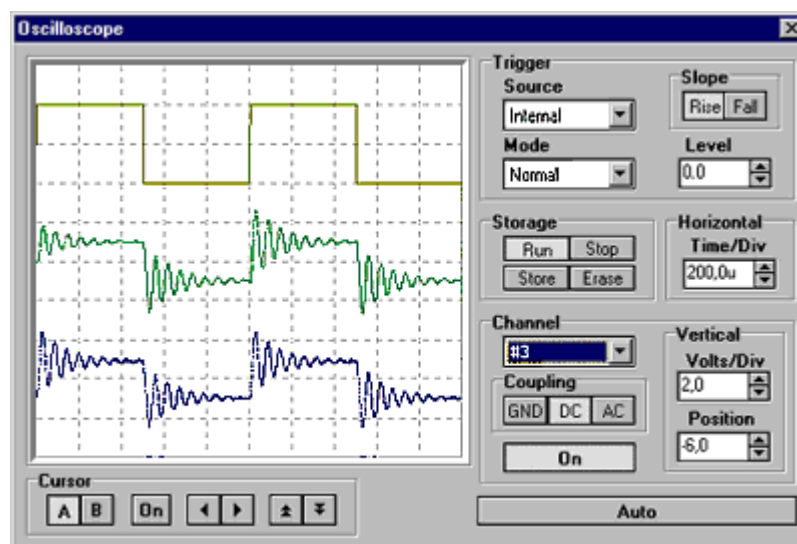
- Spektrální analyzátor, měření amplitudových a fázových diagramů, frekvenčních charakteristik,
- 16 kanálový číslicový I/O (40MHz),
- Multimetr pro měření stejnosměrného a střídavého napětí v rozsahu od 1mV do 400V a proudu od 100 μ A do 2A. Multimetr umožňuje také měřit elektrický odpor v rozsahu od 1 Ω do 10M Ω ,
- Je možno také dokoupit analogovou a digitální měřicí kartu, každá s 10 předdefinovanými měřicími úlohami, kterou lze zapojit z přední strany zařízení.



Obr. 16 Multifunkční rozhraní k PC TINALab II

Real-time paměťový osciloskop Obr. 17

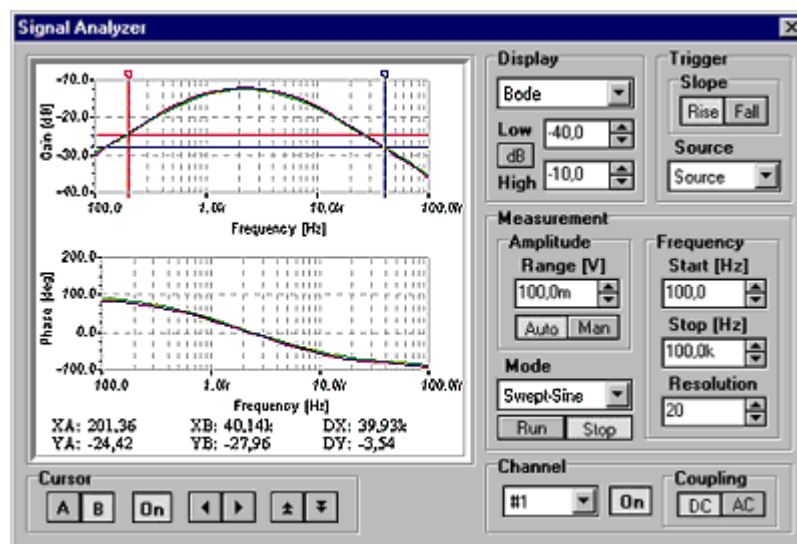
Sleduje aktuální časovou reakci obvodu.



Obr. 17 Paměťový osciloskop

Real-time analyzátor signálu Obr. 18

Změří odezvu frekvence obvodu v reálném čase.



Obr. 18 Analyzátor signálu

Ceny:

Tina Pro Industrial 6.0 - jednouživatelská 599 €

Tina Pro Classic 6.0 - jednouživatelská 299 €

Tina Pro Basic 6.0 - jednouživatelská 49 €

Tina Pro Education 6.0 - jednouživatelská 299 €

Tina Pro Student 6.0 - jednouživatelská 49 €

Tina Pro 6 Demo zdarma - neumožňuje ukládání vytvořených obvodů

1200 řešených příkladů

- síťová verze 200 €
- studentská verze 29 €
- jednouživatelská 69 €

Hardwarové doplňky:

TINALab II 1800 €

Analogová měřicí karta 220 €

Digitální měřicí karta 220 €

3 KOMPARACE VYBRANÝCH PROGRAMŮ

Pro bližší srovnání parametrů, vhodnosti programů k dané výuce, byly vybrány tyto programy: **Edison 4.0 CZ Basic**, **Tina** a **MicroCap**. K výběru těchto programů vedly skutečnosti, jakými jsou: cena, lokalizace do českého jazyka, využitelnost i na středních a vysokých školách, rozsah nabízených funkcí a množství předem předpřipravených ukázkových zapojení a úkolů, uživatelské prostředí, jednoduchost ovládání a rychlé pochopení činnosti programu.

Edison 4.0 CZ Basic - tento typ programu nelze srovnávat s žádnými výše zmiňovanými programy pro simulaci elektrických obvodů, z důvodu že, práce v tomto programu se značně odlišuje od práce s ostatními simulačními programy. Tyto odlišnosti spočívají zejména v jeho 3D zobrazení jednotlivých součástek a uživatel tohoto programu nemusí mít žádné hlubší elektrotechnické vzdělání pro sestavování jednoduchých elektrických obvodů. Simulace v tomto programu je velmi názorná v tom, že při závadě na některé součástce dochází k její destrukci, program přitom vydává patřičný zvukový doprovod. Tyto vadné součásti lze následně jednoduše pomocí „šroubováku“ opravit a pokračovat v simulaci. Tato aplikace je vhodná jak pro výuku na základních a středních školách, ale může být také využita na úvodní seznámení s problematikou simulace elektrických obvodů na vysokých školách, které nejsou přímo zaměřeny na výuku elektrotechniky a elektroniky.

Program Edison obsahuje množství předpřipravených experimentů, které umožňují studentům pochopit některé základní jevy, jako je např. Ohmův zákon, napěťový dělič, řazení rezistorů, nabíjení kondenzátoru, rezonance, filtry, vlastnosti transistorů, zesilovače, klopné obvody atd. Dále je zde umožněno ověřovat si znalosti při řešení problémových úkolů, jakými jsou: ověření Ohmova zákona, hledání závad pomocí měřících přístrojů, výpočty, popř. měření některých parametrů součástek v obvodu.

MicroCap, Tina - tyto typy programů jsou profesionálními nástroji, které patří ke špičce mezi simulačními programy, to platí i pro demoverzi programu MicroCap a Tina.

MicroCap Demo - omezení v této verzi jsou velmi malá a týkají se rozsahu obvodu (50 prvků, 100 uzlových rovnic) a knihoven prvků, rychlosti běhu programu, který je oproti ostré verzi přibližně 3x pomalejší. V demoverzi dále nejsou například podporovány třírozměrné grafy a některé víceparametrové analýzy. U programu MicroCap Demo je

vytvořena lokalizace do českého jazyka, kterou je možné získat např. na Internetových stránkách <http://www.cestiny.cz>.

Tina Pro 6 Demo - stejně jako MicroCap i Tina umožňuje simulaci analogových digitálních i smíšených obvodů. Demoverze neumožňuje tisknout a ukládat obvody, ale je možné tyto obvody kopírovat přes schránku a přenášet jak zapojení tak výsledky simulace ve vektorovém formátu (Windows Metafile Format). Tina ve své ostré verzi obsahuje pro účely výuky modul Exam Manager se dvěma režimy, pomocí kterých může připravovat problémové úlohy a program vyhodnocuje správnost odpovědí studenta. Omezení demoverze umožňují pouze simulaci velmi jednoduchých zapojení. Program Tina dále obsahuje interpret příkazů, který lze použít minimálně jako velmi kvalitní programovatelný vědecký kalkulátor. Na programu Tina je postavena aplikace Edison, která je v současné době distribuována v českém jazyce firmou Terasoft a je evaluována pro využití při výuce na základních a středních školách, z čehož vyplývá, že školy mohou použít pro nákup tohoto produktu peníze ze státní dotace. Díky jeho cenové dostupnosti je velmi využívaným programem na těchto typech škol. Firma Terasoft rovněž připravuje uvedení na trh i aplikaci Tina v lokalizované verzi.

Jako velkou výhodu oproti aplikaci MicroCap vidím u aplikace Tina možnost dokoupit rozšiřující externí modul (TINALab II), který umožňuje s využitím aplikace Tina provádět současně se simulací obvodů i reálná měření na skutečných obvodech a tato měření porovnávat a vyhodnocovat.

Z výše uvedeného porovnání nelze jednoznačně určit, který ze zde uvedených produktů (simulačních programů pro smíšenou analýzu a simulaci obvodu) je vhodnější pro využití při výuce, to záleží na individuálních potřebách a možnostech každé školy, lektora nebo učitele. Ale z hlediska využití na středních školách se jeví jako vhodnější použití aplikace Edison a následně aplikace Tina. Pro využití na vysokých školách bych spíše doporučil aplikaci MicroCap a SNAP, ale samozřejmě i ostatní simulační programy se mohou s úspěchem využít při výuce.

Při porovnávání vhodnosti využití simulačních programů ve výuce zde nebyla zmíněna aplikace SNAP, která je spíše vhodná pro využití na vysokých školách pro symbolickou, semisymbolickou a numerickou analýzu linearizovaných obvodů. Tuto aplikaci je možné získat zdarma jako freeware na Internetové adrese: <http://snap.webpark.cz>. Při porovnávání

zde nebyla uvedena rovněž aplikace Multisim. Tato aplikace stejně jako aplikace Tina neumožňuje ukládání schémat na disk, ale v porovnání s ní je cena ostré verze této aplikace vyšší než cena programu Tina. Vlastnosti těchto aplikací byly popsány výše.

3.1 Shrnutí

Počítačová analýza elektrického obvodu je realizována ve dvou na sebe navazujících krocích. Nejprve se vytvoří model obvodu a pak proběhnou požadované výpočty nad tímto modelem. Model obvodu se dnes nejčastěji vytváří pomocí schematického editoru. Alternativou je tvorba textového souboru – netlistu, do něhož se smluveným způsobem vloží informace o jednotlivých součástkách obvodu a jejich vzájemném propojení. Netlist, resp. soubor, jehož je netlist součástí, je generován rovněž schematickými editory jako zdroj vstupních dat simulátoru. Schematický editor ke své funkci potřebuje knihovnu schematických značek jednotlivých součástek. Pro účely jejího dalšího rozšiřování a pohodlné modifikace uživatelem je potřebné, aby tato knihovna existovala ve formě samotného textového souboru.

Všechny tři soubory, tj. vstupní soubor, knihovna značek i netlist mají formát, který je specifický pro konkrétní schematický editor. Tyto soubory tudíž nejsou jednoduše přenositelné mezi různými programy. Existuje pouze snaha, aby netlisty vykazovaly jednotné rysy formátu, používaného v programech z rodiny SPICE.

Schematický editor umožňuje práci v několika režimech. Schematické editory profesionálních simulátorů nabízejí řadu dalších režimů. Každý editor se bohužel liší i ve filozofii tvorby schématu, v ovládání, ve způsobu pokládání značek součástek na plochu a kreslení vodičů. Způsob zadávání parametrů součástek souvisí s podobou knihoven součástek, které jsou nepostradatelnou součástí každého simulátoru a ve většině případů výrobci součástek poskytují knihovny svých obvodů na Internetových stránkách.

Důležité při tvorbě simulace jsou vazby mezi první a druhou etapou počítačové simulace, tj. etapou přípravy dat k simulaci a navazující etapou realizace vlastní simulace. Schematický editor může být samostatným programem, který předává data dalšímu programu, vlastnímu simulátoru, prostřednictvím netlistu. Další možností je sloučit schematický editor s výkonnou výpočetní částí do jednoho celku. To s sebou přináší některé výhody, např.

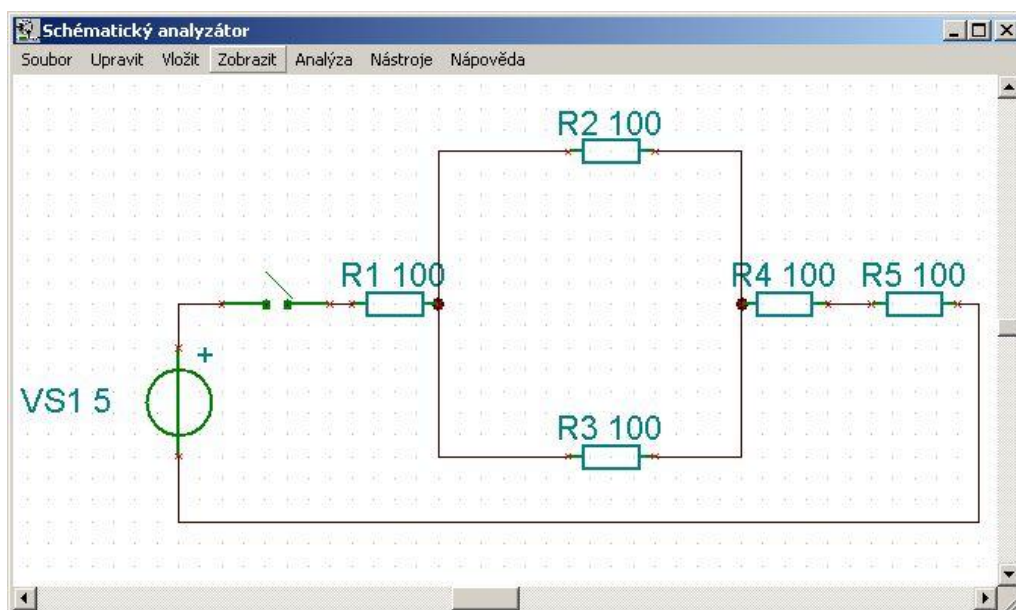
zpětné promítání výsledků simulací přímo do schématu (vizualizace uzlových napětí a další efekty). Toto řešení je uplatněno například u simulátorů MicroCap a TINA.

4 UKÁZKOVÉ PŘÍKLADY

Tato část bude obsahovat několik řešených příkladů, které objasňují základní práce a možnosti využití simulačních programů, které byly vybrány jako vhodné pro využití při výuce.

Příklad 1: Edison - sérioparalelní kombinace rezistorů

- Sestavte obvod zobrazený na Obr. 19. Změřte napětí U na rezistorech $R1$ až $R5$. Napájecí napětí $VS1 = 5V$, hodnoty $R1$ až $R5 = 100\Omega$
- Sestavte obvod zobrazený na Obr. 19. Změřte proud I který protéká rezistorem $R2$, $R3$ a $R4$. $VS1=5V$, hodnoty $R1$ až $R5 = 100\Omega$



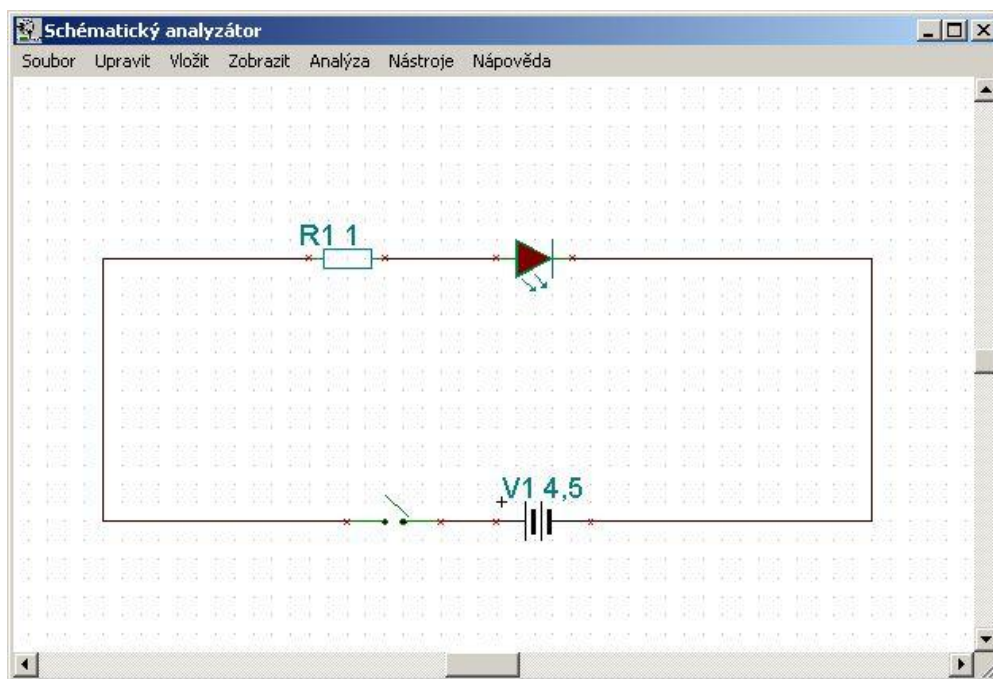
Obr. 19 Sérioparalelní kombinace rezistorů

Řešení:

- Studenti sestaví obvod podle zadání a pomocí virtuálních měřících přístrojů provedou měření a) napětí a b) proudů.
- Výsledky měření:
 - $U_{R1} = 1,43V$; $U_{R2} = 0,71V$; $U_{R3} = 0,71V$; $U_{R4} = 1,43V$; $U_{R5} = 1,43V$.
 - $I_{R2} = 7,14 \text{ mA}$; $I_{R3} = 7,14 \text{ mA}$; $I_{R4} = 14,29 \text{ mA}$.

Příklad 2: Edison - měření na LED diodě

- a. Sestavte obvod zobrazený na Obr. 20. Určete hodnotu rezistoru R1 tak, aby byl úbytek napětí na LED diodě $U_{LED}=1,699$ V. Měření proveďte s červenou LED diodou. Napájecí napětí $U_{cc}(V1)=4,5$ V .
- b. Sestavte obvod zobrazený na Obr. 20. Určete hodnotu rezistoru R1 tak, aby proud protékající LED diodou měl hodnotu $I_{LED}=16,9$ mA. Měření proveďte se žlutou LED diodou. Napájecí napětí $U_{cc}(V1)=4,5$ V



Obr. 20 Měření na LED diodě

Řešení:

1. Studenti sestaví obvod podle zadání a pomocí virtuálních měřících přístrojů provedou měření.
2. Výsledky měření:
 - a. $R1 = 46 \Omega$
 - b. $R1 = 125 \Omega$

Příklad 1: Tina - dělič napětí I

Sériově zapojený obvod je často řešen jako obvod děliče napětí. Napětí zdroje se rovná úhrnu všech úbytků napětí přes sériově zapojené rezistory. Úbytek napětí na rezistoru je přímo úměrné hodnotě odporu toho rezistoru. Rovnice děliče napětí je:

$$V_X = \frac{R_X}{R_T} V_S \quad \text{Rovnice 1}$$

kde:

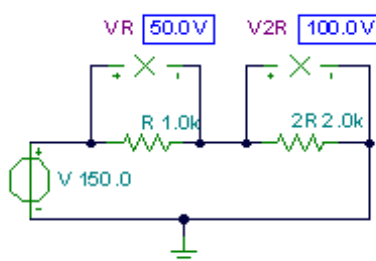
V_X = úbytek napětí na rezistoru

R_X = odpor měřeného rezistoru

R_T = celkový odpor sériového obvodu

V_S = zdroj napájecího napětí

Najděte úbytek napětí na obou rezistorech (Obr. 21), je dáno $V = 150\text{V}$, $R = 1\text{k}\Omega$.



Obr. 21 Dělič napětí I

Řešení:

1. Vypočítáme proud procházející sériovým obvodem.
 - a. Nejprve vypočteme celkový odpor obvodu:
 $R = R_1 + R_2 = 1\text{k} + 2\text{k} = 3\text{k}\Omega$.
 - b. Výpočet proudu: $I = V/R = 150/3 = 50\text{ mA}$.
 - c. Výpočet úbytku napětí na rezistoru: R_1 : $V_1 = I R_1 = 50\text{ V}$ a na rezistoru R_2 : $V_2 = I R_2 = 100\text{ V}$.

2. Použitím rovnic pro výpočet děliče napětí:

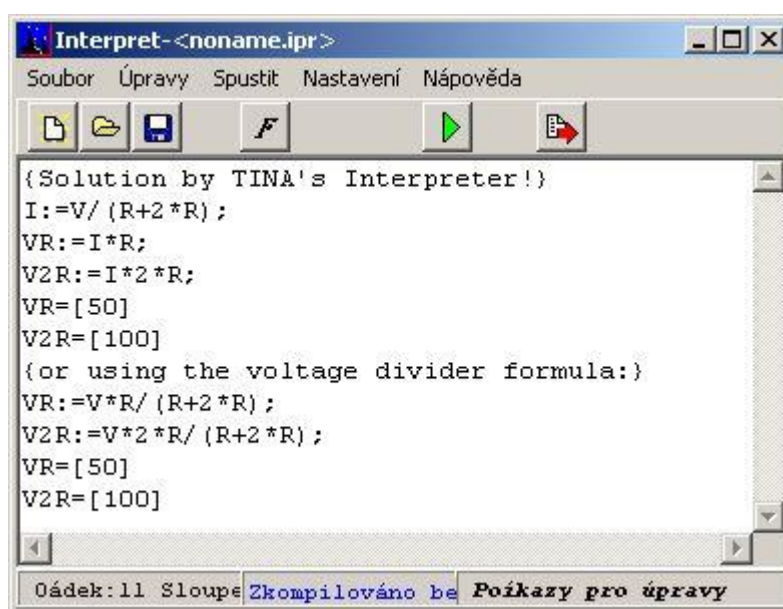
$$V_1 = V \frac{R}{R + 2R} = 150 \frac{1k}{1k + 2k} = 50V$$

Rovnice 2

$$V_2 = V \frac{2R}{R + 2R} = 150 \frac{2k}{1k + 2k} = 100V.$$

Rovnice 3

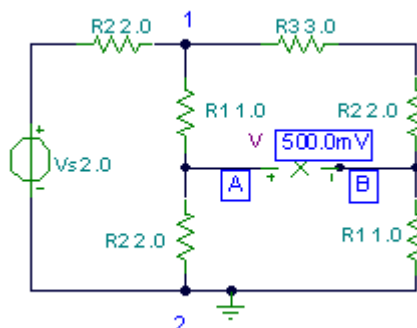
3. Řešení pomocí interpretu v programu Tina - Obr. 22



Obr. 22 Řešení pomocí interpretu v programu Tina

Příklad 2: Tina - dělič napětí II

Najděte napětí mezi uzly A a B (Obr. 23).



Obr. 23 Dělič napětí II

Řešení:

1. Výpočet pomocí vzorce:

$$V_{AB} = V_s \frac{(R1 + R2) \cdot (R1 + R2 + R3)}{R2 + \frac{(R1 + R2) \cdot (R1 + R2 + R3)}{2 \cdot R1 + 2 \cdot R2 + R3}} \left(\frac{R2}{R2 + R1} - \frac{R1}{R1 + R2 + R3} \right) \quad \text{Rovnice 4}$$

2. Řešení pomocí interpretu v programu Tina - Obr. 24

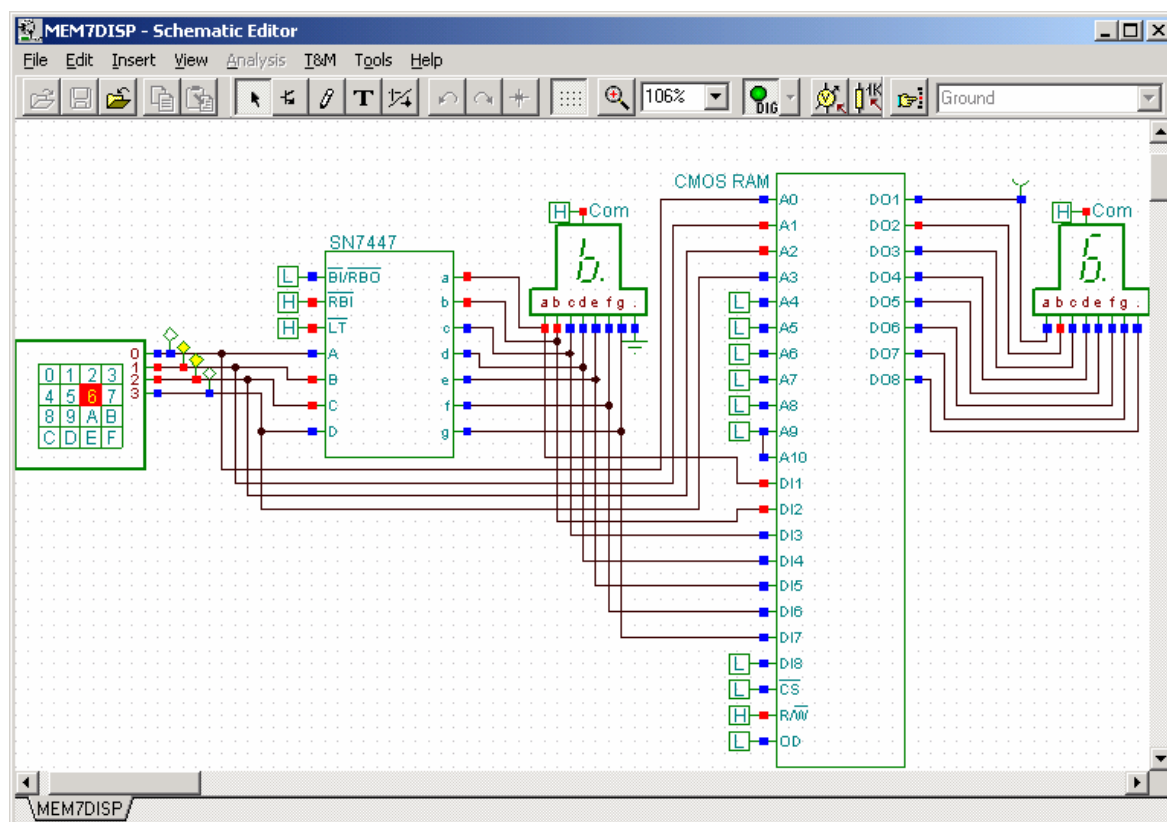


Obr. 24 Řešení pomocí interpretu v programu Tina

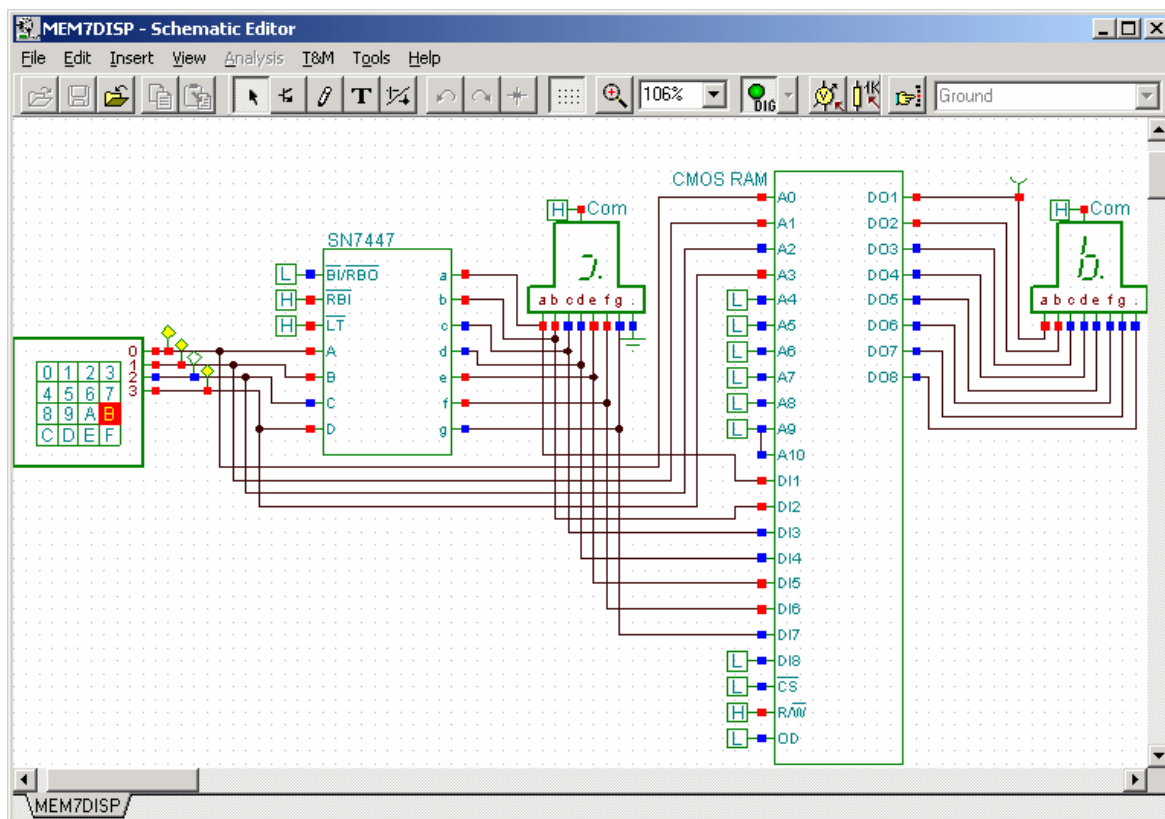
Příklad 3: Tina - Ukázka funkce sedmi segmentového displeje a RAM paměti

(Obr. 25, Obr. 26 a Obr. 27)

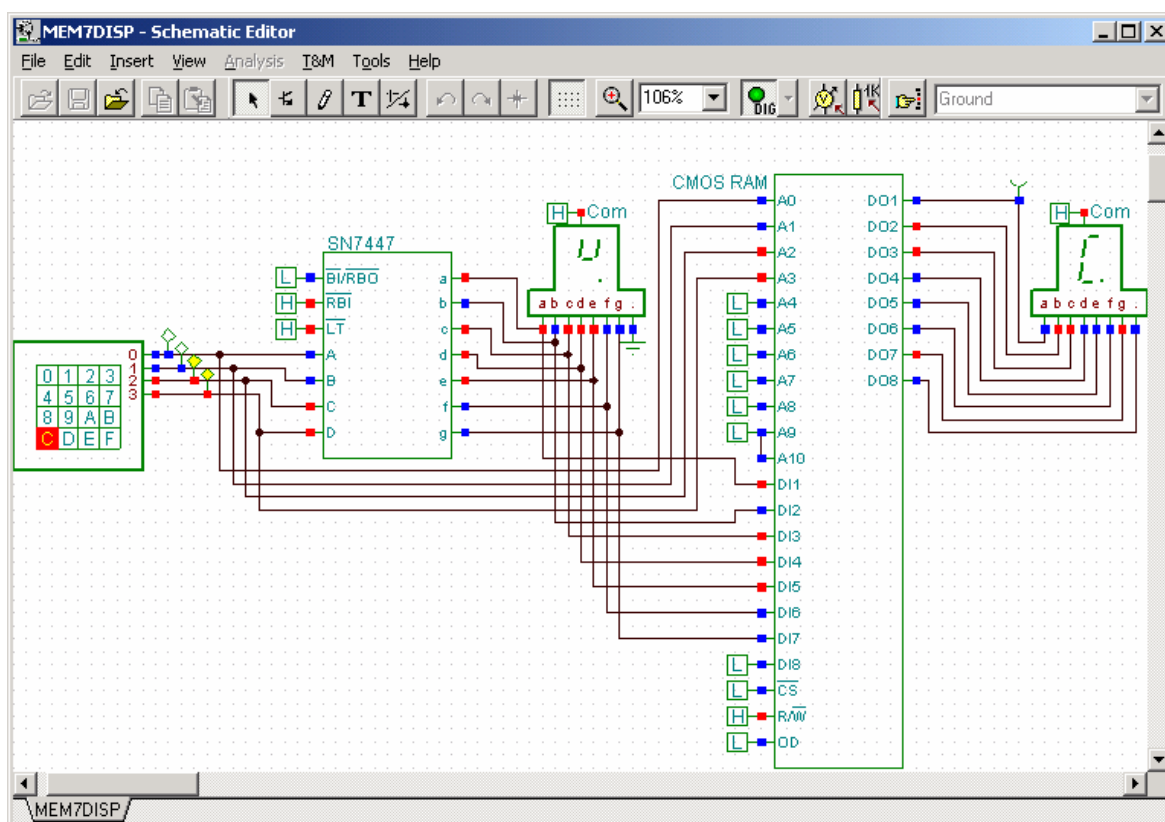
Obvod SN7447 je dekodér BCD na sedmi segmentový zobrazovač. Tento dekodér správně dekóduje jen číslice 0 až 9, ostatní znaky hexadecimálního kódu dekódovat nedovede. Modul RAM naproti tomu zvládá dekódovat i ostatní číslice A až F správně. Všimněte si rozdílu mezi číslicí '6' u SN7447 a modulu RAM. Pozor je třeba dávat na rozdíl čísla '6' a čísla 'b'.



Obr. 25 Rozdílné zobrazení čísla „6“ u SN7447 a modulu RAM.



Obr. 26 Chybné zobrazení čísla „B“ BCD dekodérem



Obr. 27 Chybné zobrazení čísla „C“ BCD dekodérem

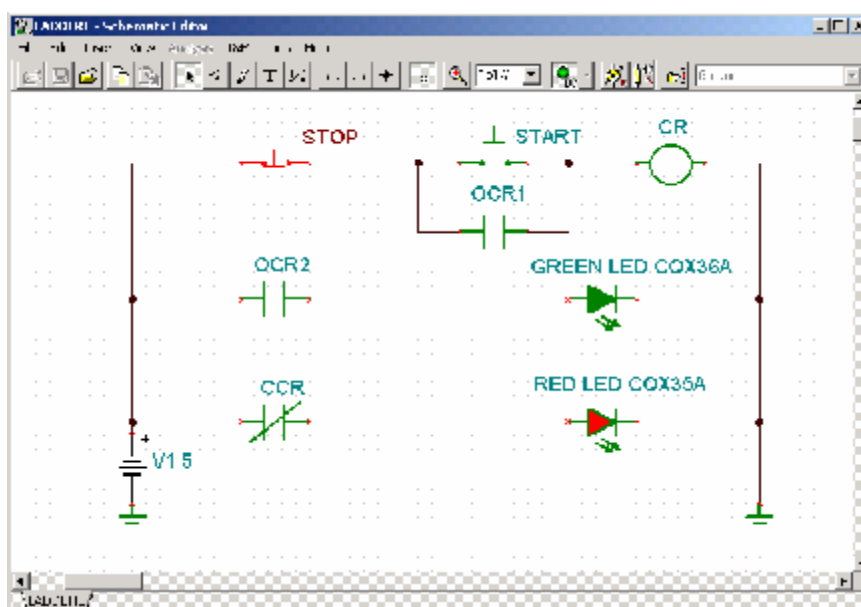
Příklad 4: Tina Ovládání tlačítkem START – STOP

Tento obvod simuluje ovládání (**zapnuto** Obr. 29/**vypnuto** Obr. 28) zařízení pomocí dvou tlačítek START a STOP. V příkladu jsou stavy signalizovány pomocí LED diod.

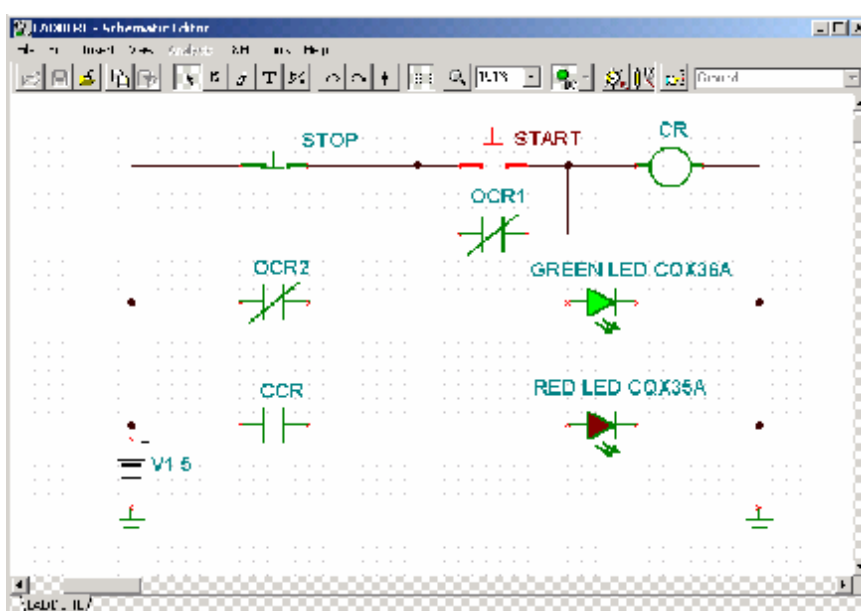
CR - cívka řídicího relé

OCR1 a OCR2 – rozepnutá relé přepínače

CCR – sepnuté relé přepínače



Obr. 28 Obvod ve stavu „vypnuto“ – svítí červená LED dioda

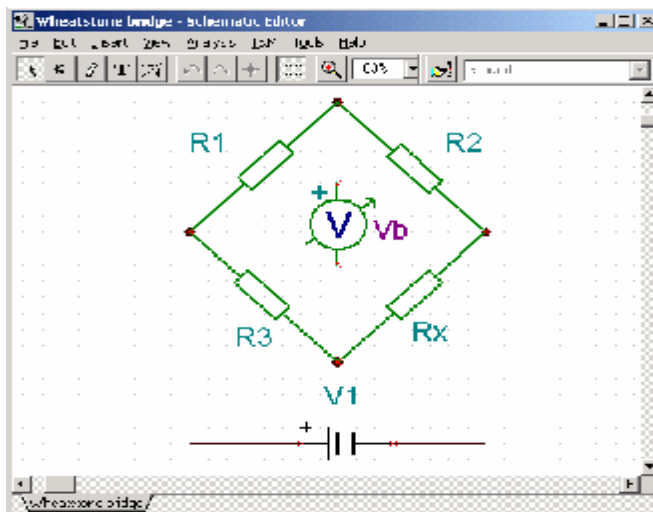


Obr. 29 Obvod ve stavu „zapnuto“ – svítí zelená LED dioda

Příklad 5: Tina – Wheatstonův můstek (Wheatstone bridge)

Určete hodnotu rezistoru R_x Wheatstonova můstku Obr. 30 tak, aby bylo výsledné napětí $V_b = 0V$.

Jsou dány hodnoty: $R_1=5\ \Omega$; $R_2=8\Omega$; $R_3=10\Omega$; $V_1=5V$



Obr. 30 Wheatstonův můstek

Řešení:

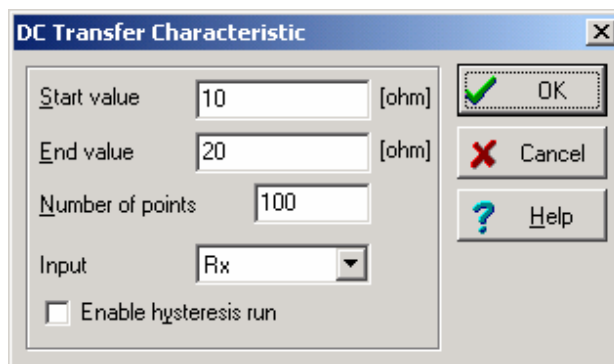
a. Numerický výpočet:

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1} = 16\Omega$$

Rovnice 5

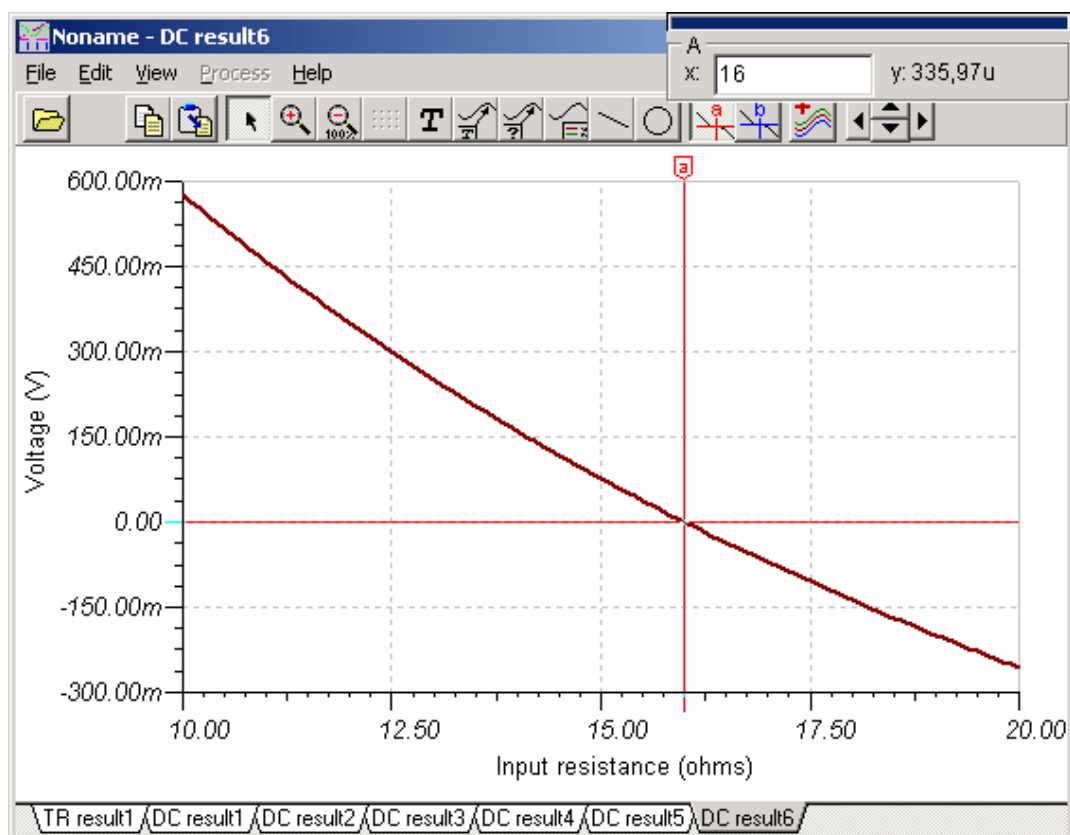
b. Vytvořením stejnosměrné přechodové charakteristiky v aplikaci Tina:

Jako vstupní hodnota (Input) je zvolena neznámá hodnota R_x , která se krokuje v rozmezí předpokládané hodnoty R_x (10 až 20 Ω)

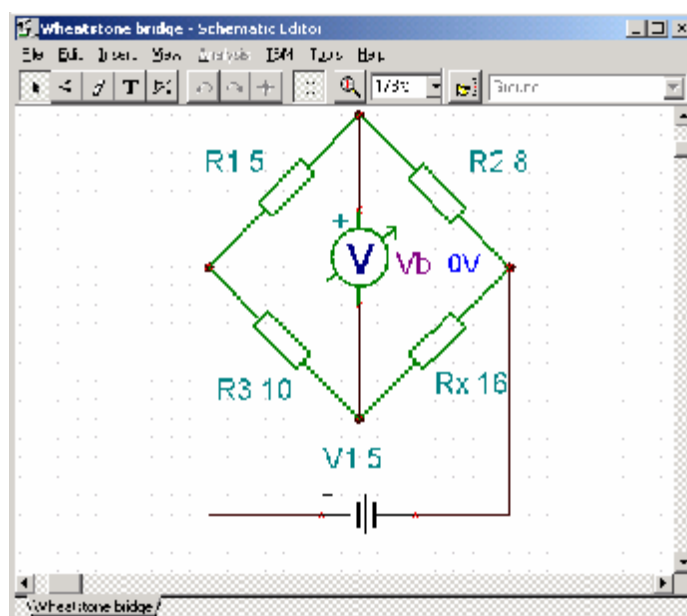


Obr. 31 Nastavení přechodové charakteristiky

Po vykreslení charakteristiky můžeme pomocí souřadného kříže určit hodnotu rezistoru R_x při napětí 0V Obr. 32. Na Obr. 33 je znovu schéma Wheatstonova můstku při DC analýze se zadanou hodnotou rezistoru $R_x=16\Omega$ a hodnotou napětí $V_b=0V$.

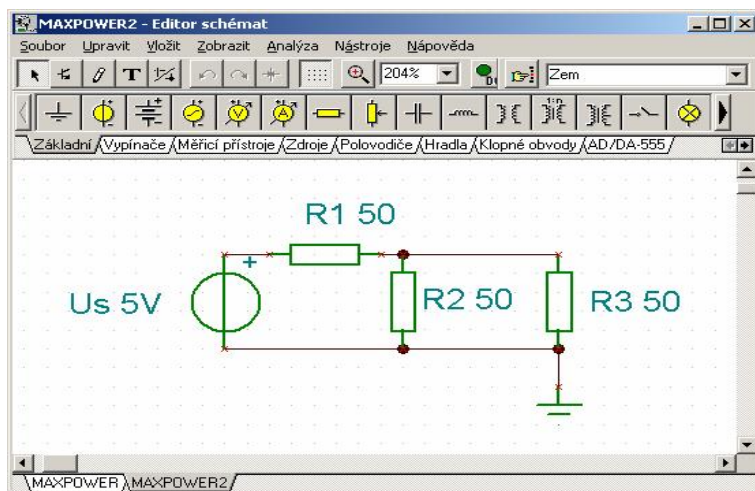


Obr. 32 Přechodová charakteristika

Obr. 33 DC analýza obvodu, $R_x=16\Omega$ a $V_b=0V$

Příklad 6: Tina – ztrátový výkon rezistoru - Obr. 34

Pomocí funkce Interpret Obr. 35 vypočítáme a zobrazíme charakteristiku Obr. 36 závislosti hodnoty rezistoru R3 a ztrátového výkonu na rezistoru R3



Obr. 34 Ztrátový výkon rezistoru - schéma zapojení

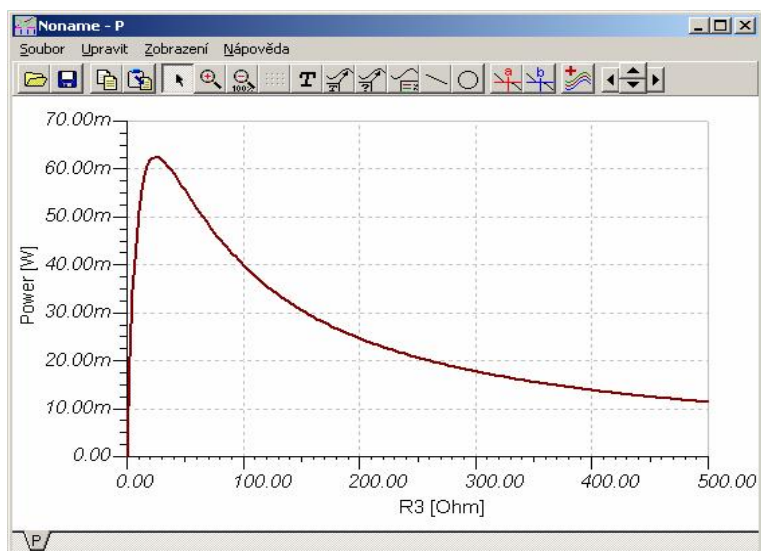
```

{ Dvakrát klikněte pro vyvolání funkce interpret }
Function PowerR3 (R3);
Begin
    PowerR3 := Sqr (Us) * Sqr (R2) * R3 / Sqr (R1 * R2 + R1 * R3 + R2 * R3);
End;

Draw( PowerR3 (R3), P )
  
```

At the bottom, it says 'Oádek:1 Sloupec:2 Kompilováno bez chyb' and 'Pořádky pro úpravy'.

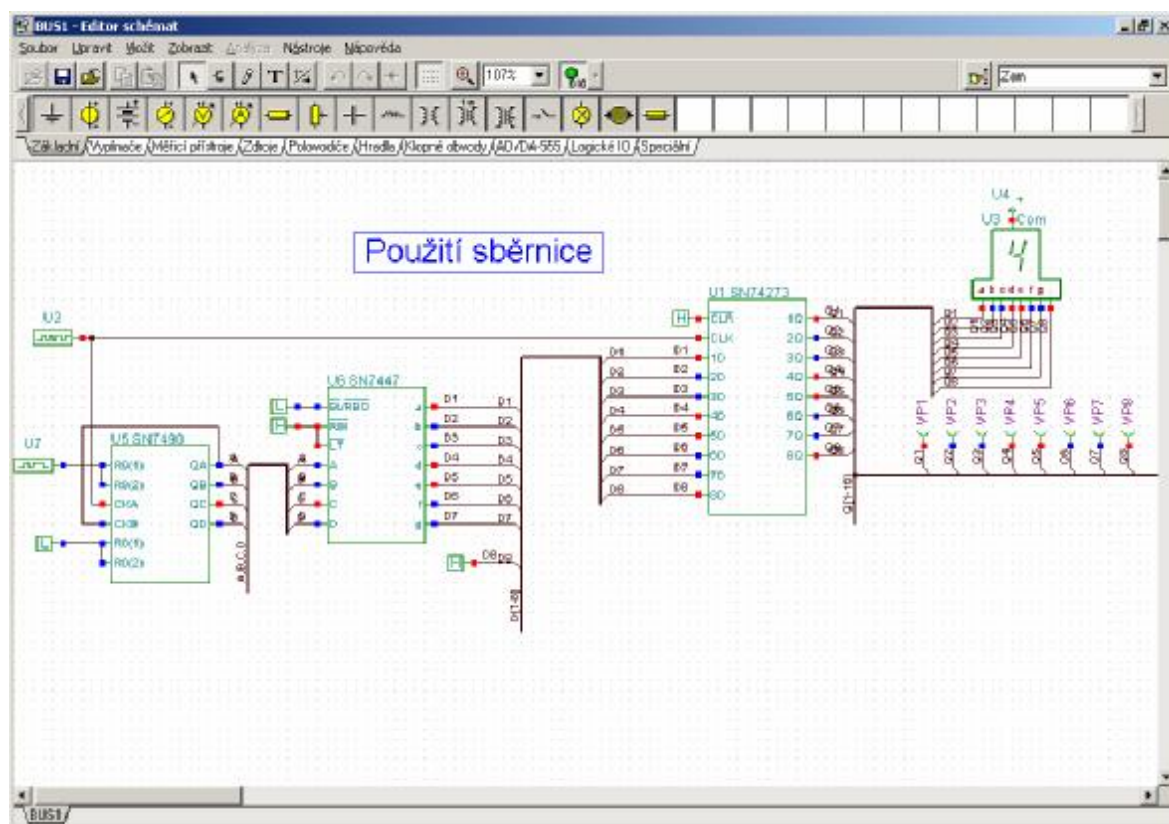
Obr. 35 Interpret výpočtu a vykreslení charakteristiky



Obr. 36 Ztrátový výkon na rezistoru

Příklad 7: Tina – příklad využití sběrnice

Při propojování integrovaných obvodů je možné z hlediska větší přehlednosti použít pro propojení sběrnici Obr. 37



Obr. 37 Použití sběrnice (BUS)

Další příklady a ukázky práce se simulačními programy je možné získat z příloženého CD ROM disku, kde jsou k dispozici demoverze všech výše popisovaných simulačních programů, které již zahrnují některé ukázkové obvody nebo z Internetových stránek výrobců již zmiňovaných aplikací.

Na CD ROM disku se ještě nachází výukový materiál do prostředí aplikace Microsoft Class Server „EDISON - multimediální elektrolaboratoř.ims“, využívaná při výuce práce s aplikací EDISON.

ZÁVĚR

Metody analýzy elektrických obvodů, ať už jsou vykonávány „ručně“ nebo pomocí počítače, byly vyvinuty zejména pro ty, kterým přináší radost a uspokojení objevovat dosud nepoznané, v našem případě hledat vlastnosti a předvídat chování elektrických systémů na základě znalosti jejich modelů. Věrohodnost získaných výsledků silně závisí na věrohodnosti výchozích modelů a na korektnosti postupů od modelu ke konečným výsledkům. Oba uvedené faktory je třeba mít neustále pod kontrolou, a to jak při ručních výpočetních postupech, tak zejména při použití simulačních programů. Pokud nerozumíme detailně funkci analyzovaného obvodu, měli bychom se alespoň snažit jeho chování lépe porozumět právě prostřednictvím kritického vyhodnocování výsledků analýzy. Nekritické přebírání a interpretace výsledků sebedokonalejšího simulačního programu může vést k fatálním důsledkům. Mysleme tvůrčím a hledajícím způsobem. Při analýze obvodů existují jediná „dogmata“: základní zákony a principy teoretické elektrotechniky. Kromě nich nejsme svázáni ničím jiným, nežli dostatečností dvojí: naší zkušenosti + naší schopnosti analytického myšlení. Výsledky analýzy nepřebíráme automaticky, ale konfrontujeme je naším úsudkem. Chyby i úspěchy budou formovat naši zkušenost a poučí nás o míře respektu k fyzikální podstatě problému, který by měl být v každém okamžiku nadřazen našemu respektu k sebedokonalejšímu nástroji analýzy. Složitý simulační program se může stát v rukou neznalého uživatele bezcennou hračkou. Potřebujete-li simulační program ke své práci, udělejte všechno pro to, abyste se nestali jeho neznalým uživatelem.

Cílem bakalářské práce bylo představit některé ze simulačních programů pro elektroniku, jejich porovnání z hlediska dostupnosti, cenové variace a využitelnosti v dané oblasti. Zadání a zásady zpracování jsou obsaženy v bakalářské práci v odpovídající požadované míře. Výběr porovnávaných programů záležel pouze na subjektivním postoji zpracovatele bakalářské práce, na jeho úsudku a kvalifikaci jednotlivých programů a na subjektivním stanovení váhových kritérií pro výběr aplikací.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

Monografické publikace:

- [1] LÁNÍČEK, R.: Simulační programy pro elektroniku. Praha, BEN, 2000. ISBN 80-86056-86-4.
- [2] BIOLEK, D.: Řešíme elektrické obvody. Praha, BEN, 2004. ISBN 80-7300-125-X.
- [3] BURIAN, Z., KREJČIŘÍK, A.: Simuluj. Praha, BEN 2002. ISBN 80-7300-005-9.
- [4] LÁNÍČEK, R.: Elektronika, obvody - součástky - děje. Praha, BEN, 1998. ISBN 80-86056-86-4.

Příspěvek ve sborníku

- [5] BIOLEK, D.: Program SNAP v. 2.6: Nové možnosti pro výuku i výzkum. STO-7, VA Brno, 1999, s. 66-69. ISBN: 80-214-1392-1. K dispozici na:
http://www.vabo.cz/Stranky/biolek/veda/articles/STO7_3.pdf
- [6] BIOLEK, D., KOLKA, Z.: Využití programu SNAP 2.6 ve vybraných elektrotechnických předmětech. STO-7, VA Brno, 1999, s. 70-75. ISBN 80-214-1392-1. K dispozici na:
http://www.vabo.cz/Stranky/biolek/veda/articles/STO7_2.pdf
- [7] BIOLEK, D.: Respektování didaktických principů při využívání počítačových programů ve výuce elektrických obvodů. ELEKTROREVUE, prosinec 1999. K dispozici na: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/99008/index.htm>
- [8] BIOLEK, D.: Výuka obecných metod analýzy lineárních obvodů. STO-5, VA Brno, 1994, s. 1-4. K dispozici na:
http://www.vabo.cz/Stranky/biolek/veda/articles/STO5_2.pdf.
- [9] BIOLEK, D.: "Behaviorální" modelování v programu MicroCap VI. ELEKTROREVUE, červen 2000. K dispozici na:
<http://www.elektrorevue.cz/clanky/00021/index.htm>.

WWW stránky

- [10] <http://www.cadware.cz>.
- [11] <http://www.hw.cz>.
- [12] <http://shop.ben.cz>.

- [13] <http://snap.webpark.cz>.
- [14] <http://www.spectrum-soft.com>.
- [15] <http://www.electronicworkbench.com>
- [16] <http://www.tina.com>
- [17] <http://www.terasoftware.cz/edison>
- [18] <http://www.elektrorevue.cz>
- [19] <http://www.vabo.cz>
- [20] <http://www.classserver.cz>
- [21] <http://www.zkola.cz>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Dělení obvodů na lineární, nelineární, nesetřvačné a setřvačné.....	14
Obr. 2 Komplettní analýza nelineárního obvodu postupnou analýzou jeho dílčích modelů ...	16
Obr. 3 Zjednodušené schéma mechanismu časové analýzy v simulačním programu.....	19
Obr. 4 Zjednodušené schéma mechanismu kmitočtové analýzy v simulačním programu	21
Obr. 5 Struktura netlistu SPICE.....	25
Obr. 6 Jednocestný usměrňovač.....	26
Obr. 7 Netlis programu MicroCap	27
Obr. 8 Struktura simulačního programu SNAP	29
Obr. 9 SNAP - jednostupňový tranzistorový zesilovač	30
Obr. 10 SNAP - neinvertující zesilovač	31
Obr. 11 Zjednodušené blokové schéma programu MicroCap.....	33
Obr. 12 Pracovní plocha aplikace EDISON.....	40
Obr. 13 Schématický analyzátor.....	41
Obr. 14 Charakteristika	41
Obr. 15 Matematický model	42
Obr. 16 Multifunkční rozhraní k PC TINALab II	44
Obr. 17 Paměťový osciloskop.....	44
Obr. 18 Analyzátor signálu	45
Obr. 19 Sérioparalelní kombinace rezistorů.....	50
Obr. 20 Měření na LED diodě	51
Obr. 21 Dělič napětí I	52
Obr. 22 Řešení pomocí interpretu v programu Tina.....	53
Obr. 23 Dělič napětí II.....	54
Obr. 24 Řešení pomocí interpretu v programu Tina.....	54
Obr. 25 Rozdílné zobrazení čísla „6“ u SN7447 a modulu RAM.	55
Obr. 26 Chybné zobrazení čísla „B“ BCD dekodérem	56
Obr. 27 Chybné zobrazení čísla „C“ BCD dekodérem	56
Obr. 28 Obvod ve stavu „vypnuto“ – svítí červená LED dioda	57
Obr. 29 Obvod ve stavu „zapnuto“ – svítí zelená LED dioda.....	57
Obr. 30 Wheatstonův můstek.....	58
Obr. 31 Nastavení přechodové charakteristiky	58
Obr. 32 Přechodová charakteristika	59
Obr. 33 DC analýza obvodu, $R_x=16\Omega$ a $V_b=0V$	59
Obr. 34 Ztrátový výkon rezistoru - schéma zapojení	60
Obr. 35 Interpret výpočtu a vykreslení charakteristiky	60
Obr. 36 Ztrátový výkon na rezistoru	60
Obr. 37 Použití sběrnice (BUS)	61

SEZNAM PŘÍLOH

P 1 : CD ROM