

# Analýza elektronických obvodů (nejen) na počítači

Prof. Ing. Dalibor Biolek, CSc., K301 VA Brno, Kounicova 65, PS 13, 612 00 Brno

[dalibor.biolek@vabo.cz](mailto:dalibor.biolek@vabo.cz)

<http://www.vabo.cz/stranky/biolek>

## **Abstrakt**

*V článku jsou některé úvahy o trendech vysokoškolské výuky metod analýzy obvodů v slaboproudé elektrotechnice. Nejsou rozebírány možnosti výuky na středních školách, neboť autor k tomu není kompetentní. Nicméně středoškolským učitelům může být níže uvedený materiál užitečný při modernizaci učebních osnov a při využívání počítačových simulačních programů ve výuce.*

## **1. Úvod**

Hodně se změnilo od dob, kdy jsme při analýze jevů v elektrických obvodech ještě neměli k ruce zdatného pomocníka – osobní počítač. Pomineme-li elementární obvody, s nimiž se studenti setkávají na úvod svého studia elektrotechniky, pak se náš zájem postupně přenáší k integrovaným blokům, které mají sice složitou vnitřní strukturu, ale na druhou stranu se často vyznačují principiálně jednoduchým vstupně-výstupním chováním. To nám umožňuje provádět rozbor principů složitých systémů přiměřeně jednoduchými metodami na úrovni bloků. Horší je to však s předvídáním vlivu reálných vlastností elementů vnitřní struktury těchto bloků na chování celku. Jinými slovy, principiálně by se mělo zařízení chovat správně, ale po jeho realizaci zjistíme, že jsme ve své analýze neuvažovali (a ani nemohli uvažovat) to a ono... . Zde je používání klasických „školních“ metod analýzy, jako jsou např. grafické metody hledání pracovních bodů pomocí nelineárních charakteristik prvků, metoda zatěžovací přímky, přibližné metody řešení přechodných jevů apod. naprosto nemyslitelné. Pak na scénu přichází počítač, nejprve s vykřičníky, posléze s množícími se otázkami: do jaké míry přehodnotit dosavadní způsoby výuky řešení obvodů, a vůbec způsobu výuky elektrotechniky, s ohledem na vývoj v posledním desetiletí?

Ať se to učitelům líbí nebo ne, jejich studenti jsou dnes m.j. i uživatelé počítačů, a dlužno říci, že tuto činnost vykonávají vesměs rádi, i když s často „povrchní zaujatostí“. Záleží hodně na učiteli, zda se na jeho hodinách stanou pouhými „uživateli“ elektrotechnického software, kdy sice budou velmi rychle získávat výsledky, avšak nebudou příliš rozumět tomu, co dělají, nebo zda začnou využívat elektrotechnický CAD jako nástroj k řešení praktických problémů a snad i jako svého „soukromého učitele“ elektrotechniky. V tom druhém případě se však neobejdou bez základních znalostí teorie, jakož i principů analyzačních metod, implementovaných v softwarových simulátorech obvodů. S problémy s tím spojenými se dnes potýkají učitelé na řadě elektrofakult. Nicméně nevyhnou se jim ani střední školy, kde je tlak na využívání počítačových programů pro elektrotechniku rovněž velmi silný. Podrobněji jsou tyto otázky rozvedeny v [15], [20-23].

Článek má následující strukturu:

V části 2 navazující na tento úvod jsou heslovitě vysvětleny základní pojmy, které se často používají při řešení elektrických obvodů: modelování, analýza a simulace. Část 3 je věnována analýze jakožto elementární součásti řešení elektrotechnických problémů. Jsou formulovány některé pedagogické cíle analýzy. V části 4 je vysvětleno, co jsou to heuristické a algoritmické metody analýzy. V části 5 je provedeno dělení používaných analyzačních metod s ohledem na typ řešeného elektrického obvodu. Část 6 dává do souvislosti druhy metod analýzy s ději, probíhajícími v simulačním programu. V části 7 je poukázáno na různá úskalí, která je třeba překonat v zájmu efektivního využívání simulačního software, jakož i na nezbytné teoretické poznatky, kterými by měl být uživatel programu vyzbrojen.

## 2. 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 programu.

Programy pro řešení obvodů se někdy dělí na **analyzační** (analyzátoři) a **simulační** (simulátory). Na rozdíl od simulátorů, které jsou schopny realizovat různorodou škálu různých typů analýz s využíváním složitých modelů zakomponovaných do knihoven prvků, analyzátoři 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.

Příklad analýzy: Výpočet klidového stejnosměrného proudu odebraného z napájecího zdroje tranzistorového zesilovače.

Příklad simulace: Zkoumání vlivu kolísání teploty v mezích od 0°C do 100°C na výše uvedený proud.

## 3. 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 1: Je dán model Wheatstoneova mostu, tvořený čtveřicí rezistorů R1, R2, R3 a R4, 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 pomocí „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.

Příklad 2: Student si stáhne z Internetu SPICE model integrovaného zesilovače VCA610 a chce zjistit šum pronikající na jeho výstup při uzemněných vstupech, při řídicím napětí 0V a při teplotě čipu 27°C (cílem analýzy). Model začlení do svého simulátoru a sestaví příslušné schéma. Zadá požadavek na analýzu – spektrální hustotu výkonu šumového napětí na daném výstupu v zadaném kmitočtovém pásmu. Výše uvedené se stává vstupem analýzy spolu s použitým modelem VCA610 a globálními podmínkami simulace, mezi nimiž je i zmíněná teplota. Proběhne počítačová analýza, jejímž výsledkem je požadovaná kmitočtová závislost (výstup analýzy). Analýza byla interně

provedena na základě modifikované metody uzlových napětí šumového modelu obvodu (metoda analýzy). Forma analýzy je dána prostředkem její realizace – počítačem s nainstalovaným software – zadávání modelu obvodu proběhlo v prostředí schématického editoru, příslušné výpočty a zobrazení výsledků ve vlastním simulátoru. Forma interních analyzačních procedur je uživateli skryta a závisí na použitých numerických algoritmech a jejich naprogramování.

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 [14]:

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, viz např. [15], [20].

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 [16]:

1. *Využívání speciálního programového vybavení. V případě elektrotechnických návrhů jsou typickými představiteli simulátory obvodů (PSPICE, MicroCap, TINA, 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 software 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 [6-7], [24-26]. V tomto bodu ale elektrotechnické fakulty svým studentům ledačos dluží.

#### 4. 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** [14]. 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.

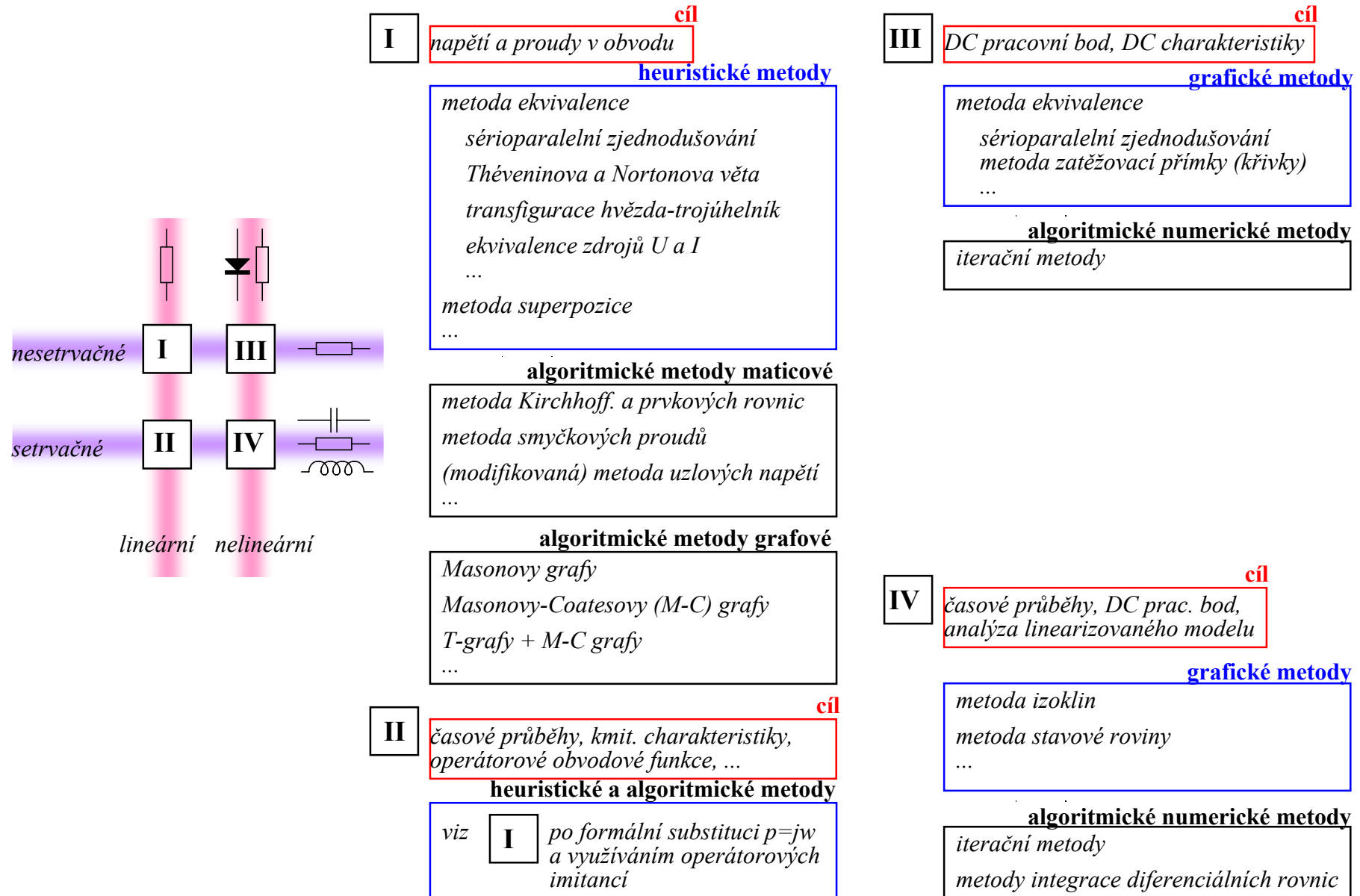
V první fázi studia elektrotechniky je žádoucí vést studenta k tomu, aby přistupoval k analyzační úloze tvořivě za pomoci znalosti Ohmova zákona, Kirchhoffových zákonů a základních principů teoretické elektrotechniky. Pedagogický cíl č 1 z předchozí části je tedy třeba naplňovat pomocí nealgoritmických 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. Podrobnosti jsou popsány v [14].

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.

#### 5. Dělení metod analýzy podle charakteru modelu [2]

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 nesetřvačné (odporové) a setřvačné (obsahující i akumulární prvky) obvody. Vznikají tak čtyři základní kombinace a příslušné metody je pak možné rozčlenit do skupin I až IV podle obr. 1.



Obr. 1. Dělení obvodů na lineární, nelineární, nesetřvačné a setřvačné a tomu odpovídající metody jejich analýzy.

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 setrvačné 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 přímkou u tranzistorového zesilovače), nikoliv však výkonnou analyzační pomůckou – tou se stal simulační program. Poslední skupinou metod jsou metody pro analýzu nelineárních setrvačných 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. Existuje více variant modifikované metody uzlových napětí, zájemce odkazujeme na literaturu [7], [14].

Pro rychlé „ruční“ řešení lineárních obvodů, jakož i pro snadnější chápání jejich funkce, je velmi výhodné osvojit si metody *grafů signálových toků* [1]. 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). Masonovy grafy jsou vhodné pro analýzu systémů s blokovou strukturou, kde každý z bloků je popsán přenosovou funkcí. Pak struktura Masonova grafu je velmi podobná vlastnímu schématu a mnohdy se graf ani nemusí kreslit. Pro obvody obsahující běžné součástky typu R, L, C, operační zesilovače apod. jsou výhodné Masonovy-Coatesovy grafy (M-C grafy) [3], které lze sestavit přímo ze schématu analyzovaného obvodu. Z různých důvodů (zejména krácení hodin na výuku teoretických partií) je výuka grafů signálových toků na školách postupně potlačována. Zájemce odkazujeme na literaturu [1], [3-4].

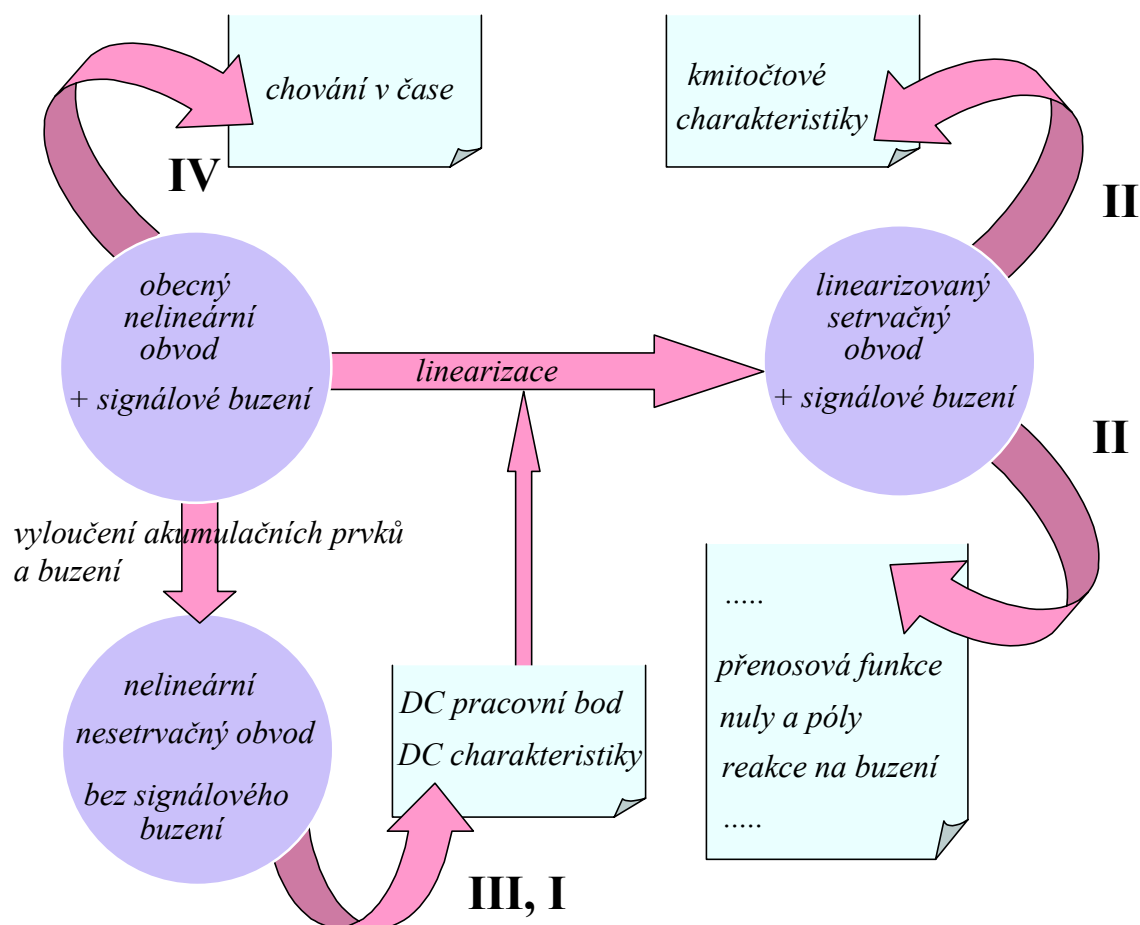
## 6. Souvislosti mezi metodami analýzy z pohledu simulačního programu

Z hlediska logiky výše uvedené klasifikace lze často v učebních osnovách vyzorovat 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 vyplyne 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 stejnoseměrných napětí ve všech uzlech a stejnoseměrných proudů všemi větvemi obvodu v ustáleném stavu, k němuž dojde po napojení obvodu na stejnoseměrné napájecí zdroje. Přitom případné střídavé signálové zdroje jsou vyřazeny z činnosti, tj. jsou nahrazeny jejich stejnoseměrnými složkami (většinou nulovými). Dále simulátor vyřadí z obvodu všechny akumulací prvky, které nemají na stejnoseměrný pracovní bod vliv. Vznikne model nesetrvačného 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. ampérvoltové charakteristiky diod, nelineární charakteristiky tranzistorů, napět'ové převodní charakteristiky číslicových obvodů apod. je třeba opakovat výpočet stejnoseměrného pracovního bodu pro různé velikosti příslušných stejnoseměrných budících zdrojů. V simulátorech bývá tento režim označován jako DC analýza, která patří j 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. CIA (pracující na numerickém principu) [13], nebo SNAP (pracuje na symbolickém principu) [31], dokáží 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. Jak vyplývá z níže uvedeného rozboru, za tímto účelem může simulátor znovu počítat stejnosměrný pracovní bod. Jádrem časové analýzy v simulátoru bývá algoritmus numerické integrace nelineárních diferenciálních rovnic obvodu.

## 7. Problémy se „zvládnutím“ simulačních programů studenty a uživateli vůbec

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:

*a) 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 induktořů.*

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.

*b) 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 induktořů – 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.

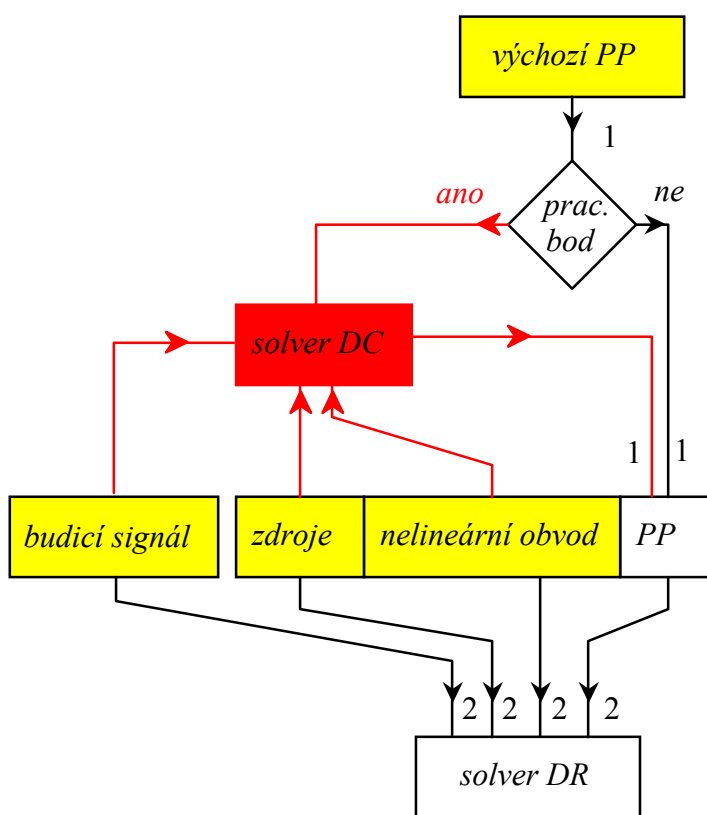
*c) Připojíme-li obvod k stejnosměrným napájecím zdrojům, pak po odeznění přechodných dějů obvod „naběhne“ do stejnosměrného ustáleného stavu. Neznámé (vypočítané) veličiny simulátoru by pak odpovídaly stejnosměrnému pracovnímu bodu. Nelineární obvod může vykazovat několik pracovních bodů. Ke kterému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

*d) Stejnosměrný pracovní bod je hledán analýzou nelineárního nesetrvačného 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.



Obr. 3. Zjednodušené schéma mechanismu časové analýzy v simulačním programu. 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. 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, budící 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, budit 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, budit 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, budit vstupním signálem, a v tomtéž okamžiku kdybychom připojili zesilovač k napájecímu zdroji.

Známý simulátor MicroCap [27] 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 budícího signálu.

**Příklad 2.** Colpittsův oscilátor.

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

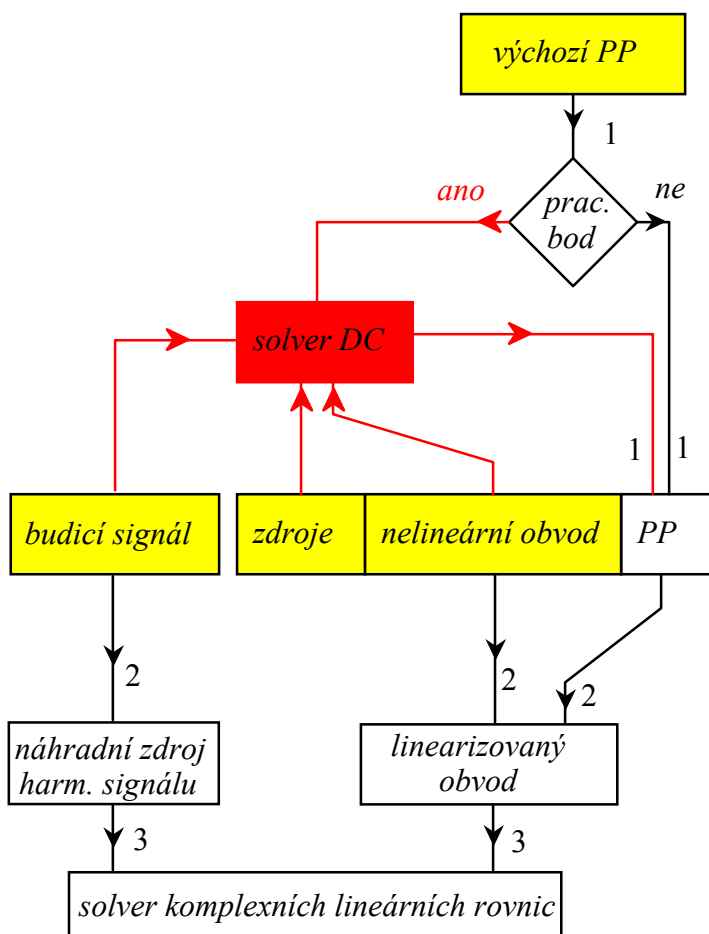
Simulátor se snaží nalézt stejnosměrný pracovní bod, přičemž vychází z prvního odhadu – zadaných počátečních podmínek. Vzhledem k povaze obvodu (na mezi stability, stejnosměrný ustálený stav není zaručen) nemusí být pracovní bod nalezen a pro uživatele ani není zajímavý. Analýza v tomto režimu nemá smysl.

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.

Na obr. 4 je zjednodušené znázornění interních mechanismů, které působí v simulátoru při kmitočtové (AC) analýze.



Obr. 4. Zjednodušené schéma mechanismu kmitočtové analýzy v simulačním programu.

V první fázi simulace se tak jako u časové analýzy naplní vektor počátečních podmínek, v druhé fázi se sestaví linearizovaný model obvodu a budící 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.

## Literatura a odkazy

*Knihy, skripta, učební texty a články o metodách analýzy elektrických obvodů*

- [1] ČAJKA,J.-KVASIL,J.: Teorie lineárních obvodů. TKI, SNTL/ALFA 1979.
- [2] BIOLEK,D.: Elektrické systémy. Skriptum VA Brno, S-1589, 1995, 83s.
- [3] BIOLEK,D.-BIOLKOVÁ,V.: Signal Flow Graphs Suitable For Teaching Circuit Analysis (Grafy signálových toků vhodné pro výuku analýzy obvodů). Přijato na konferenci Radioelektronika2001, Brno. Česká verze je k dispozici na [http://www.vabo.cz/Stranky/biolek/veda/articles/RADIO01\\_C.pdf](http://www.vabo.cz/Stranky/biolek/veda/articles/RADIO01_C.pdf)
- [4] BIOLEK,D.-BIOLKOVÁ,V.: Analysis of Circuits Containing Active Elements by Using Modified T - Graphs (Analýza obvodů s aktivními prvky pomocí modifikovaných T- grafů). Přijato na konferenci CSCC01, Kréta. Česká verze je k dispozici na [http://www.vabo.cz/Stranky/biolek/veda/articles/CSCC01\\_C.pdf](http://www.vabo.cz/Stranky/biolek/veda/articles/CSCC01_C.pdf)

*Knihy, skripta, učební texty a články o řešení obvodů pomocí počítače*

- [5] LÁNÍČEK, R.: Simulační programy pro elektrotechniku. Nakladatelství BEN, 2000. ISBN 80-86056-86-4.
- [6] MANN,H.: Využití počítače v elektrotechnických návrzích. SNTL Praha, 1984.
- [7] VLACH,J.-SINGHAL,K.: Computer Methods for Circuit Analysis and Design. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1982. K dispozici je též ruský překlad Mašinnyje metody analiza i projektirovanija elektronnyh schem, Moskva, Radio i Svjaz, 1988.
- [8] KEJHAR,M. a kol.: Program SPICE v příkladech. Skriptum ČVUT Praha, 1995. ISBN 80-01-01348-0.
- [9] BIOLEK,D. a kol.: TERO. Využití počítačových programů v elektrotechnice. Skriptum VA Brno, S-1738, 1992, 124s.
- [10] BIOLEK,D.: Počítačová cvičení v teorii obvodů. Skriptum VA Brno, S-803, 1995, 89s.
- [11] BIOLEK,Z.-BIOLEK,D.: MICROCAP IV. Program pro analýzu elektrických obvodů. STUDENT-L. Lupress s.r.o., učební text SPŠE Rožnov p.R., 1996.
- [12] BIOLEK,D.: "Behaviorální" modelování v programu MicroCap VI. ELEKTROREVUE, červen 2000. K dispozici na <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00021/index.htm>
- [13] DOBEŠ,J.: Analýza nelineárních statických a dynamických elektronických obvodů. 1. seminář "Spolupráce vysokých a středních škol", Pardubice , 13. říjen 1999, s. 13-18. ISBN 80-902417-5-1.

*Obecné otázky využití počítačů ve výuce*

- [14] 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](http://www.vabo.cz/Stranky/biolek/veda/articles/STO5_2.pdf)
- [15] 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>
- [16] BIOLEK,D.: Využití programů pro symbolickou a semisymbolickou analýzu elektrických obvodů ve výuce i výzkumu. ELEKTROREVUE, prosinec 1999. K dispozici na <http://www.elektrorevue.cz/clanky/99012/index.htm>
- [17] 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](http://www.vabo.cz/Stranky/biolek/veda/articles/STO7_3.pdf)
- [18] 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](http://www.vabo.cz/Stranky/biolek/veda/articles/STO7_2.pdf)

- [19] BIOLEK,D.: Využití programů pro symbolickou a semisymbolickou analýzu ve výuce elektrických obvodů. 1. seminář "Spolupráce vysokých a středních škol", Pardubice, 13. říjen 1999, s. 19-24. ISBN 80-902417-5-1. K dispozici na <http://www.vabo.cz/Stranky/biolek/veda/articles/PARDUBICE99.pdf>
- [20] BOREŠ,P.-MARTINEK,P.: Výuka a počítač. Seminář STO-6 Moderní směry výuky elektrotechniky a elektroniky, VA Brno, 1997, s. 125-128.
- [21] BIOLEK,Z.: Počítačové experimenty ve výuce elektrotechnických předmětů. Seminář STO-6 Moderní směry výuky elektrotechniky a elektroniky, VA Brno, 1997, s. 129-131.
- [22] DOSTÁL,T,-PODROUŽEK,V.: Zkušenosti s výukou a použitím výpočetní techniky v kursu Navrhování elektronických obvodů. Seminář STO-6 Moderní směry výuky elektrotechniky a elektroniky, VA Brno, 1997, s. 136-139.
- [23] BIOLEK,Z.: Podpora výuky základů elektrotechniky pomocí programu MC5. Seminář STO-7 Moderní směry výuky elektrotechniky a elektroniky, VA Brno, 1999, s. 86-88.

#### *Knihy o numerických metodách*

- [24] RALSTON,A.: Základy numerické matematiky. ACADEMIA, Praha 1973.
- [25] PRESS,W.H. et al.: Numerical Recipes in Pascal. The Art of Scientific Computing. Cambridge University Press, 1994. ISBN 0-521-37516-9 (book), 0-521-37532-0 (CD). Dostupné na <http://www.nr.com>
- [26] ACTON, F.S.: Numerical Methods that Work. The Mathematical Association of America, Washington D.C., 1990. ISBN 0-88385-450-3.

#### *Domovské stránky některých simulačních a analyzačních programů*

- [27] MicroCap VI – <http://www.spectrum-soft.com>
- [28] Electronics Workbench a Multisim – <http://www.cadware.cz/cad204.htm>,  
<http://www.electronicworkbench.com/>
- [29] PSpice – <http://pcb.cadence.com/company/move.asp>, <http://www.ee.mtu.edu/faculty/rzulinsk/pspice.htm>
- [30] TINA – <http://www.designsoftware.com/TINA.HTM>
- [31] SNAP – <http://www.fee.vutbr.cz/UREL/snap>
- [32] Programy Prof. Valsy – <http://www.fee.vutbr.cz/UTEE/OBVODY/index.html>
- [33] Programy využívané na FEL ČVUT v Praze – <http://hippo.feld.cvut.cz/~bores/prog/uvod.htm>