

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



TEZE K DISERTAČNÍ PRÁCI

Disertační práce byla vypracována v ~~prezenční/distanční~~/kombinované* formě doktorského studia na katedře (Radioelektroniky) Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

Uchazeč: Pospíšil Ladislav
LVR ČVUT FEL v Praze
Technická 2, Praha 6

Školitel: Dobeš Josef
Radioelektroniky
Fakulta elektrotechnická ČVUT
Technická 2, Praha 6

Školitel-specialista: (uvést, pokud byl jmenován)
pracoviště (katedra, ..., ústav AV ČR aj.)
adresa

Oponenti:

.....

.....

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod. před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru (*název*) v zasedací místnosti č Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

S disertací je možno se seznámit na děkanátu Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, na oddělení pro vědu, výzkum a zahraniční styky, Technická 2, Praha 6.

(*jméno*)
předseda komise pro obhajobu disertační práce
ve studijním oboru
název
Fakulta elektrotechnická ČVUT, Technická 2, Praha 6

* nehodící se vynechá

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra radioelektroniky

Ladislav Pospíšil

**MODELOVÁNÍ NELINEÁRNÍCH PRVKŮ
VYSOKOFREKVENČNÍCH OBVODŮ NEURONOVÝMI SÍTĚMI**

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Radioelektronika

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha, *únor 2012*

1 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

V současné době pro modelování mikrovlnných polovodičových prvků existuje mnoho modelů s různou složitostí modelu [35, 34, 17, 28] a také s různou přesností tohoto modelu [2, 33, 6, 32, 26], zde je také provedeno kvalitativní porovnání těchto modelů [3, 22, 24]. V [32] je provedeno porovnávání dynamické části a statické části modelu pro čtyři různé modely s naměřenými hodnotami a v [26] je provedeno porovnání statických parametrů devíti modelů použitých pro modelování tranzistoru GaAs MESFET¹. Tranzistor MESFET patří k základním aktivním prvků mikrovlnných obvodů, fyzikální princip činnosti tohoto tranzistoru je stejný jako u JFET tranzistoru, ale hradlo MESFET tranzistoru je od kanálu izolováno přechodem kov-polovodič [5]. Za přesnější model může být považován realistický² Parker a Skellernův model [28], nicméně identifikace parametrů tohoto modelu je často velice komplikovaná a tudíž prakticky nerealizovatelná [29]. Z tohoto důvodu jsou hledány jiné cesty jak zlepšit klasické modely přidáním funkce(í) pro zlepšení parametru(ů) těchto modelů [2, 33, 6, 26].

Modelování mikrovlnných obvodů za pomoci neuronové sítě obecně (nejen pro polovodičové prvky) jsou popsány v [37]. Různé typy modelů polovodičových prvků pomocí neuronové sítě jsou také popsány v [23, 1, 25, 27, 20, 8] – [23] představuje neuronové sítě pro empirické modelování v systémech technologického modelování TCAD, [1] představuje postup modelování tranzistorů HEMT, [25] představuje modelování tranzistorů řízených polem MOSFET a AC/DC charakteristiky bipolárních tranzistorů (BJT), [27] představuje modely na bázi AlGaAs a SiGe HBT pro „malé“ a „velké“ signály, [20] představuje lineární

¹Tranzistory MESFET se nejčastěji vyrábí na bázi GaAs – pohyblivost elektronů v GaAs je mnohem větší než v Si [5].

²Tento model je nazýván „realistický“ protože důsledně používá fyzikálních principů pro výstavbu systému rovnic [5].

nelineární modely tranzistorů pHEMT a Schottky diody a [8] představuje nový přístup v implementaci modelů tranzistoru MOS pomocí neuronové sítě do simulačního prostředí třídy SPICE. Hlavní důraz bude dále kladen na metody, které jsou popsány v [37] a dále popsány a simulovány na konkrétních příkladech.

Zaměříme se zejména na tranzistory pHEMT, PJFET a D-NMESFET a dále varaktor a relativně novou perspektivní pasivní součástku *memristor* (charakteristika byla získána z [4] (Nature) a [36]). Zde uvedený příklad polovodičové diody je pouze ilustrativní a má demonstrovat schopnosti a možnosti *neuronové sítě*. Tranzistor D-NMESFET zde demonstruje „nevhodné“ chování neuronové sítě, je-li k dispozici malý počet měřených bodů. Nejprve se stručně zmíníme o současně používaných analytických modelech, o jejich přesnosti a možnostech jejich zpřesnění. Dále bylo čerpáno z článků a konferenčních příspěvků [12, 11, 10, 9, 7, 8] dále [6, 15, 5, 15, 13, 3].

2 CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE

Tato práce se zabývá *Modelování nelineárních prvků vysokofrekvenčních obvodů neuronovými sítěmi* a z toho vyplývající následující dva hlavní cíle:

1. Ověřit zda jsme schopni s využitím *neuronové sítě* a různých metodik modelování použitelný model co do přesnosti ($rms < 0,50\%$ pro další simulace je tato hodnota technicky dostatečná) a chování (průběh identifikovaných charakteristik) pro nelineární vysokofrekvenční prvky.
2. Optimalizovat strukturu zvolené topologie *neuronové sítě* s ohledem na její přesnost a průběhy identifikovaných charakteristik.

3 METODY ZPRACOVÁNÍ

3.1 ZPŘESNĚNÍ ANALYTICKÝCH MODELŮ

Možného zpřesnění analytických modelů je možno dosáhnout za použití umělých *neuronových sítí*, kterým se zabývá celá práce.

Nicméně přesnost modifikovaného modelu je jak pro statické tak i dynamickou část stále v řádu procent. Větší přesnosti lze dosáhnout za použití neuronové sítě, jednak jako přímý *neuro*³ model (užití pouze neuronové sítě), nebo jako zpřesňující korekční neuronovou síť, která je paralelně připojena k modifikovanému analytickému modelu. Tyto řešení můžeme považovat za efektivní a relativně jednoduchou cestu, která má ale také svá úskalí na která je nutno si dát velký pozor, neboť mohou výsledný model zcela znehodnotit.

Statická část modelu je popsána jako u ostatních unipolárních tranzistorů nelineárním zdrojem proudu řízený napětím *gate-source* u_{gs} a *drain-source* u_{ds} , který je popsán rovnicemi (1):

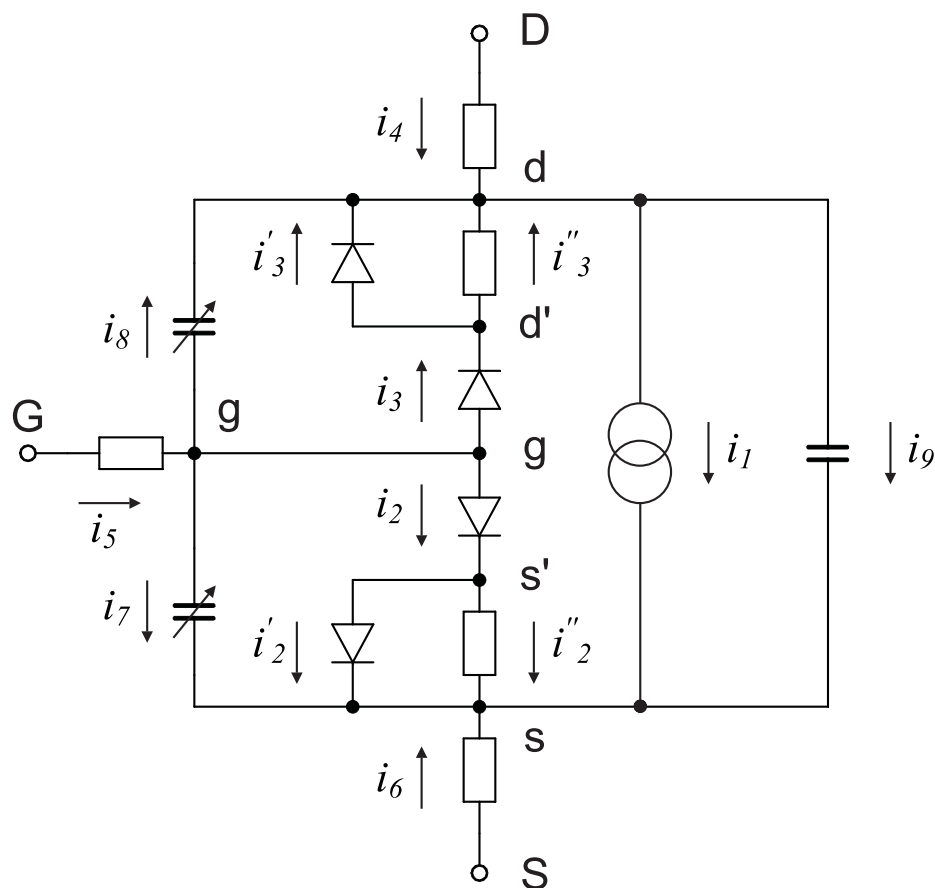
$$i_1 = \begin{cases} 0 & \text{pro } (u_{gs} - U_T \leq 0), \\ \beta(u_{gs} - U_T)^{n_2}(1 + \lambda u_{ds}) \tanh(\alpha u_{ds}) & \text{pro } (u_{gs} - U_T > 0), \end{cases} \quad (1)$$

kde $u_{gs} = u_g - u_s$ a $u_{ds} = u_d - u_s$. Schottkyho dioda *gate-source* se aproximuje dvojicí „diod“ definovaných Shockleyovými vztahy a paralelním rezistorem k druhé z nich.

3.2 POUŽITÁ NEURONOVÁ SÍŤ

V průběhu vývoje *neuronových sítí* se věnovala významná pozornost tzv. *vrstvomým neuronovým sítím*, disjunktní podmnožiny

³Pod pojmem *neuro* modelem zde uvažujeme použití pouze neuronové sítě jako mode celého prvku.



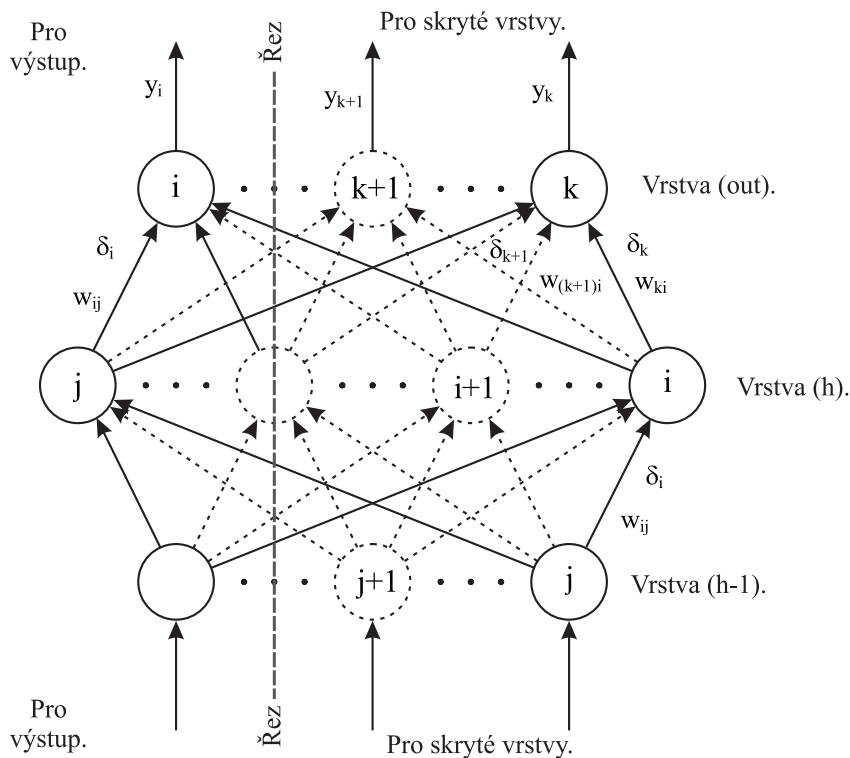
Obrázek 1: Analytický model tranzistoru MESFET.

těchto *neuronových sítí* jsou tzv. *vrstvy*. Vzájemné propojení mezi jednotlivými neurony významně ovlivňuje vlastnosti neuronové sítě. Pro každý typ úlohy je vhodné jiné propojení neuronů.

Neuronová síť je paralelní distribuovaný systém výkonných prvků modelující biologické neurony, účelně uspořádaný tak, aby byly schopny požadovaného zpracování informací.

Pro modelování mikrovlnných součástek (obvodu⁴) byla zvolena *neuronová síť* výše popsaného typu MPL (*Multilayer Perceptron*) jak je uvedeno v [37] a použito v experimentech pro modelování mikrovlnných tranzistorů v [30]. V dalším výkladu bude uvažovat vždy *neuronovou síť MLP - multilayer per-*

⁴Obecně lze neuronovou síť modelovat „libovolné“ struktury jako např. celé obvody.

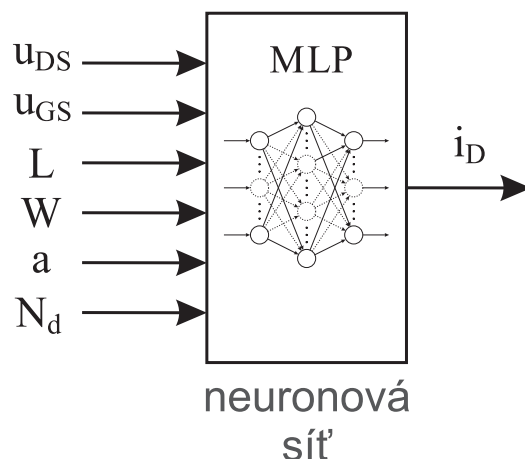


Obrázek 2: Neuronová síť MLP -MultiLayer Perceptron.

ceptron.

4 PŘÍMÝ MODEL

Přímým přístupem modelujeme vnější chování prvku (modelovaného objektu) „přímo“ *neuronovou sítí*, jak uvádí [31]. Při použití této metody modelování není nutné zjišťovat vnitřní strukturu tranzistoru (obecně jakéhokoli „obecného“ modelovaného prvku) ani nutná znalost ekvivalentního obvodu s jeho parametry. Tranzistor je charakterizován svým vnějším chováním jako jsou stejnosměrné charakteristiky nebo závislost s-parametrů. Vstupy takového modelu jsou parametry procesu (například pro tranzistory MESFET napětí *drain-source* u_{DS} a *gate-source* u_{GS} , viz příklad s tranzistorem pHEMT, a fyzikální parametry tranzistoru (například délka kanálu L , šířka kanálu W atd ...). Jde-li o jediný konkrétní tranzistor, není nutno zahrnovat tyto



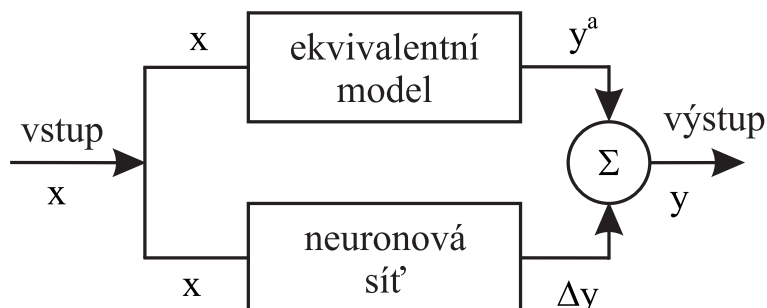
Obrázek 3: Modelování DC charakteristik tranzistoru MESFET.

fyzikální parametry do vstupu *neuro* modelu, parametry jsou konstanty a nepřinášejí žádnou informaci při procesu učení, bude vyloženo později. Výstup z *neuro* modelu je proud protékající tranzistorem i_D .

5 PARALELNÍ KOREKČNÍ NEURONOVÁ SÍŤ

Jedna z dalších metod kombinovaného modelování je metoda zpřesnění analytického modelu⁵ korekční *neuronovou sítí* zapojenou paralelně s analytickým modelem (opět je nutná znalost analytického modelu), jak ukazuje obrázek 4. Princip je jednoduchý, k zpřesnění výsledného modelu se použije *neuronová síť*, která se naučí kompenzovat nepřesnosti analytického modelu. Vstupem *neuro* modelu jsou vstupní parametry analytického modelu například pro tranzistor pHEMT jde o napětí *drain-source* u_{DS} a napětí *gate-source* u_{GS} . Jako dalším vstupem *neuro* modelu mohou být užity jiné vhodné parametry například technologické parametry tranzistoru jako ukazuje obrázek 3. Přímému modelování (naučená neuronová síť může provádět korekce pro více tranzistorů téže „rodiny“ [stejná technologie]). Výstupem je

⁵muže být užito i jiných modelů, které se mohou za použití *neuronové sítě* zpřesňovat



Obrázek 4: Použití *neuronové sítě* pro zpřesnění analytického modelu.

požadovaná korekce Δi_D (viz vzorec2), který koriguje analytický model v námi uvedeném příkladu pro tranzistor pHEMT.

6 VYUŽITÍ VÍCE NEURONOVÝCH SÍTÍ

V této metodě se využívá pro vytvoření celkového modelu propojení více *neuronových sítí* (pouze *neuronových sítí*), které vytvářejí celkový model.

Tato metoda je vhodná pro modelování prvků s komplikovanou charakteristikou, jakou je například memristor vyznačující se hysterézí. Metoda byla navržena autorem tohoto textu. Některé dosažené výsledky byly publikovány v [13] a [3], charakteristika byla získána z [4] (Nature) a [36].

Není-li možno k modelování úlohy využít některou z výše popsaných metod, a je-li možno tuto úlohu rozdělit na více nezávislých podmnožin. Lze řešit tuto úlohu pro každou podmnožinu zvlášť, nezávisle na ostatních dílčích podmnožinách s využitím

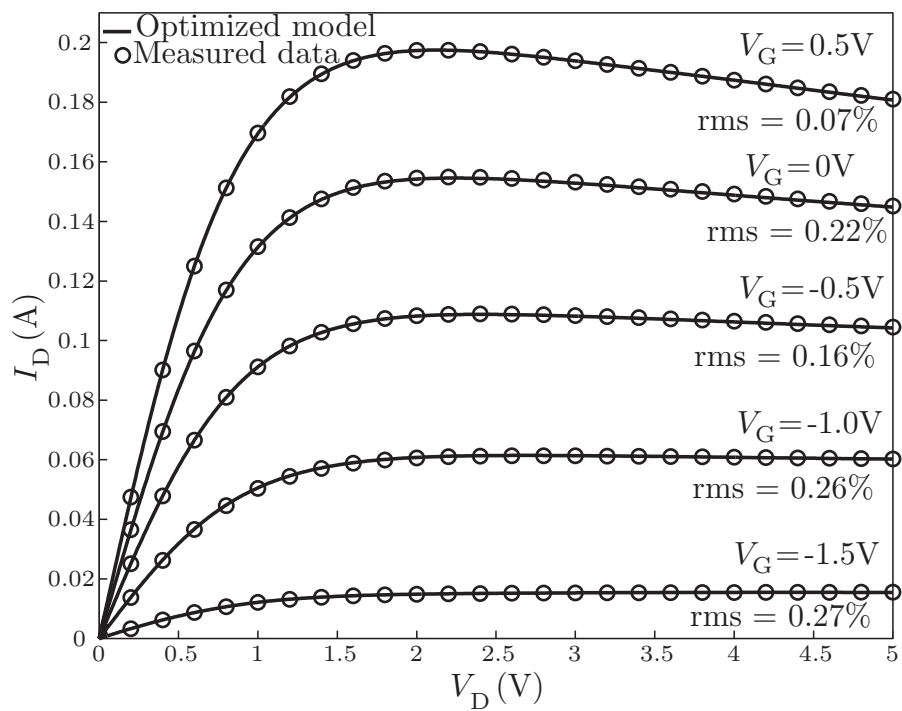
pouze *jedné neuronové sítě* a výše popsané „přímé“ metody (obdobu superpozice). Pro ilustraci této metody je uveden příklad modelu *memristoru*, kdy tento komplikovaný prvek vzhledem k jeho charakteristikám nelze modelovat pouze jednou *neuronovou sítí*, nebo některou zde popsanou kombinovanou metodou.

7 VÝSLEDKY

7.1 Tranzistor pHEMT - přímá metoda

Nyní se pokusíme identifikovat tuto závislost pomocí *neuronové sítě* se snahou o zlepšení průměrné relativní kvadratické odchylky *rms*. Průběh volt-ampérové charakteristiky tranzistoru pHEMT pro napětí $u_{GS} = 0V$ (kolečka \circ označují měřenou hodnotu, plná čára označuje hodnoty identifikované *neuronovou sítí*). Pro identifikaci tohoto průběhu byla použita „přímá“ metoda s neuronovou sítí ***MLP-1-5-12-8-1***. Model obsahuje jeden vstup (napětí *gate-source* u_{GS}) a jeden výstup (proud *drainu* i_D), parametr u_{GS} (napětí *gate-source*) je konstanta a není zahrnut jako vstupní parametr modelu. Při tomto přístupu je nutné mít pro každý parametr u_{GS} zvlášť „naučenou“ *neuronovou sít*.

Průměrná kvadratická relativní odchylka $rms = 0.0012\%$, tato hodnota *rms* ukazuje na velice dobrý výsledek identifikace. Je zde však jeden problém. V této části se charakteristika příliš „vlní“ a vykazuje zápornou derivaci. Tento problém lze odstranit jinou volbou *neuronové sítě* třeba například ***MLP-1-5-4-5-1***, zůstává zde ale problém nutnosti mít pro každé napětí u_{GS} zvlášť „naučenou“ *neuronovou sít*.



Obrázek 5: Výsledek identifikace charakteristik tranzistoru pHEMT za použití neuronové sítě MLP-2-5-4-5-1 (pro všechny charakteristiky je společně rms = 0.2 %).

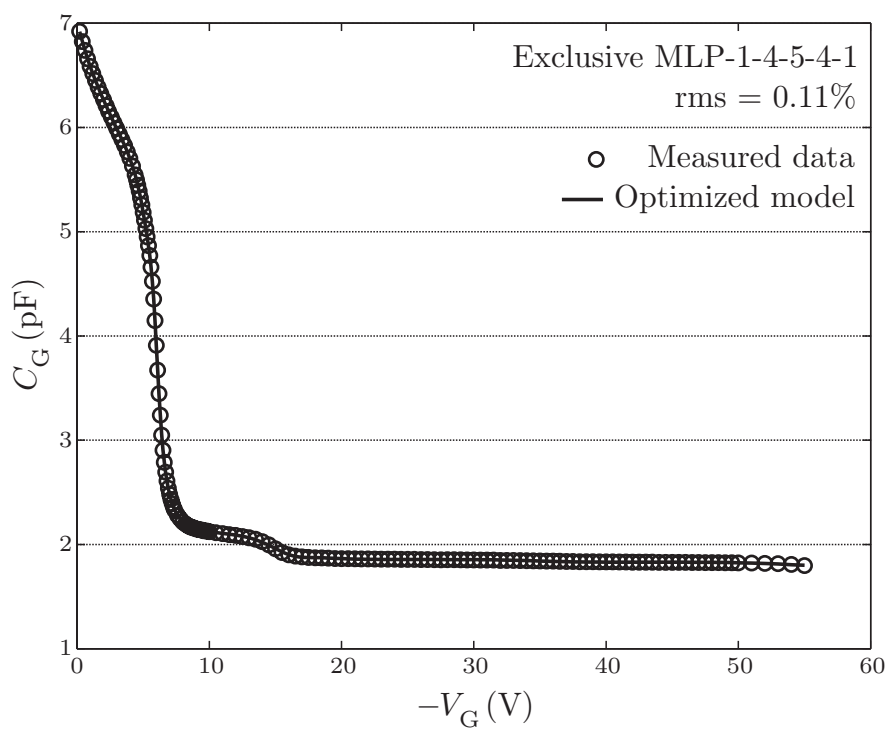
7.2 Varaktor - přímá metoda

Tento (již dostatečně dobrý) výsledek jsme se pokusili zpřesnit za použití *neuronové sítě*. Byl zvolen přístup „přímého“ model této závislosti. Pro dostatečné množství naměřených bodů (kterých v tomto případě je dostatek) vykazuje tento přístup k modelování dobré vlastnosti. Byla použita *neuronová síť MLP-1-4-5-4-1* se třemi skrytými vrstvami a s počtem neuronů v těchto skrytých vrstvách 4, 5 a 4. Jako přenosová (aktivační) funkce neuronu byla použita *sigmoidea* s parametrem strmosti $\lambda = 1$, ve výstupní vrstvě byla použita lineární přenosová funkce typu $x = y$, jejíž použití je v těchto případech obvyklé. Závislost kapacity c_D varaktoru EG8132 na napětí $-u_{GD}$ (kroužkem o jsou označeny naměřené hodnoty, identifikované hodnoty *neuronovou sítí* jsou označeny plnou čarou). Dosažená přesnost identifikace je pro průměrnou relativní kvadratickou odchylku $rms = 0,11\%$ a pro maximální relativní odchylku $\delta_{max} = 0,4\%$. Průběh relativní odchylky δ [%] v závislosti na $-u_{GD}$. Identifikace pomocí *neuronové sítě* poskytlo velice dobrý výsledek oproti analytickému modelu.

Lze říci že *neuronovou sítí* lze použít pro modelování dynamických vlastností vysokofrekvenčních prvků jako například pro tranzistory MESFET jak ilustruje výše uvedený příklad s varaktorem EG8132.

7.3 Tranzistor pHEMT - korekční metoda

Veškeré výše popsané přístupy k modelování *neuronovou sítí* v této části patřili do kategorie „přímého“ modelování. Nyní se pokusíme představit jednu z možností kombinovaného přístupu (kombinace analytického modelu a *neuronové sítě*). Tento přístup využívá *neuronovou síť* k provedení korekce chyb analytického modelu. Na obrázku je uvedena závislost chyby analytického modelu na napětí u_{DS} pro jednotlivá napětí $u_{GS} \in \{-1,5V ;$



Obrázek 6: Výsledná identifikace MO457/4 průběhu kapacity za použití neuronové sítě MLP-1-4-5-4-1, (rms = 0.11 % a δ_{\max} je pouze 0.4 %).

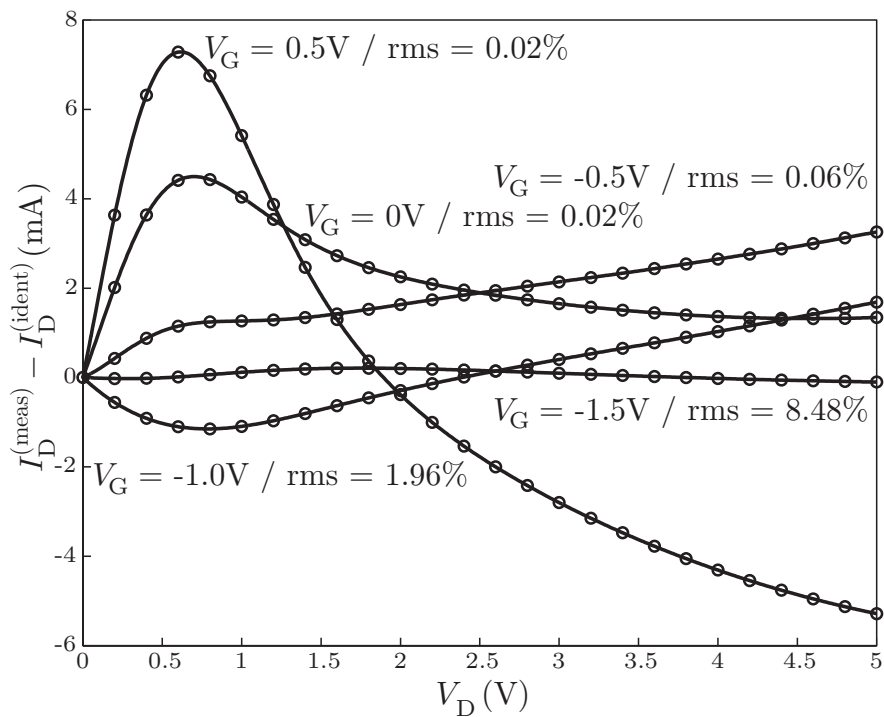
$-1,0\text{V}$; $-0,5\text{V}$; 0V ; $0,5\text{V}$ }. Odchylna analytického modelu a měřené hodnoty Δi_D je označena kroužkem (\odot). Tento rozdíl můžeme vyjádřit jako vzorec (2):

$$\Delta i_D = i_D^{(meas)} - i_D^{(identam)}, \quad (2)$$

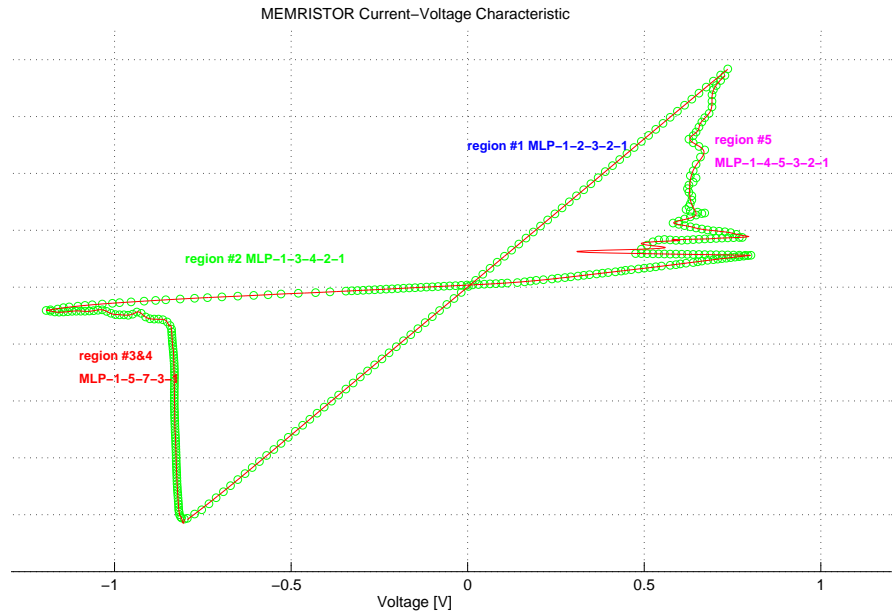
kde $i_D^{(meas)}$ je změřený proud *drainem* tranzistoru a $i_D^{(identam)}$ je proud vypočtený analytickým modelem. O použitém analytickém modelu tranzistoru včetně jeho parametrů jsme se zmínili v úvodu této části. Pro identifikaci průběhu chyby $\Delta i_D(u_{DS}, u_{GS})$ (naznačujeme, že jde o funkci dvou proměnných u_{DS} a u_{GS}) byla použita *neuronová síť MLP-2-8-10-6-1*. Vstup *neuronové sítě* tvoří dvojice hodnot napětí u_{DS} a u_{GS} , výstup sítě je korekce proudu Δi_D použitého analytického modelu. Tento *neuro* model dosáhl průměrné kvadratické relativní chyby $rms = 7,56\%$ pro všechna měřená napětí u_{GS} . Hodnoty rms pro jednotlivé napětí u_{GS} jsou uvedena v obrázku. Jak je patrné z tohoto obrázku, největší chyba rms je pro napětí $u_{GS} = -1,5\text{V}$, kde hodnota rms dosahuje hodnoty $37,24\%$. Všechny ostatní chyby rms jsou pod $0,4\%$. Velikost chyby $rms = 37,24\%$ pro napětí $u_{GS} = -1,5\text{V}$ je způsobena faktem, že hodnoty odchylek proudu Δi_D jsou pro toto napětí blízké nule (rms analytického modelu pro napětí $u_{GS} = -1,5\text{V}$ je pouze $0,83\%$). Výsledná hodnota průměrné kvadratické relativní chyby korigovaného analytického modelu *neuronovou sítí MLP-2-8-10-6-1* je $rms = 0,064\%$. Souhrn relativních chyb rms je uveden v tabulce 1.

u_{GS} [V]	0,5	0	-0,5	-1,0	-1,5	celkem	
rms [%] ¹	3,10	2,34	2,06	1,93	0,83	2,05	*1
rms [%] ²	0,07	0,22	0,16	0,26	0,27	0,20	*2
$rms \times 10^{-3}$ [%] ³	1,86	0,70	2,06	6,96	310,00	64,00	*3

Tabulka 1: Porovnání metod modelování a jejich chyb rms



Obrázek 7: Výsledek aproximace rozdílů mezi naměřenými daty a (předešle identifikovaným) modifikovaným analytickým modelem, tento rozdíl je výstupem korekční neuronové sítě MLP 2-8-10-6-1 (pro naučení sítě bylo použito 1000 trénovacích epoch).



Obrázek 8: Identifikovaná volt-ampérová charakteristika *memristoru* s použitím 4 *neuronových sítí*.

8 Memristor - kombinovaná metode

Volt-ampérová charakteristika *memristoru* je dosti komplikovaná pro modelování pouze jednou *neuronovou sítí*. Proto byl zvolen postup, kdy je využito několika nezávislých *neuronových sítí*.

Charakteristika *memristoru* byla rozdělena na celkem 5 oblastí. Každá z těchto oblastí byla identifikovaná *neuronovou sítí*, jak je uvedeno na obrázku 8. Oblast 1 a 2 byli identifikovány jako funkční závislost $y = f(x)$, oblast 1 *neuronovou sítí* **MLP-1-2-3-2-1** a oblast 2 *neuronovou sítí* **MLP-1-3-4-2-1**. Pro oblasti 3&4⁶ a 5 vzhledem k jejich průběhu, byla zvolena identifikace funkční závislosti $x = f(y)$. Oblast 3&4 (z praktických důvodů se nakonec oblasti 3 a 4 sdružili do jedné 3&4) *neuronovou sítí* **MLP-1-5-7-3-1** a oblast 5 *neuronovou sítí* **MLP-1-4-5-3-**

⁶Původně rozdělené oblasti 3 a 4 byly identifikovány jako jeden celek.

2-1.

oblast	užitá neuronová síť	rms	δ_{max}
1	MLP-1-2-3-2-1	0,50%	$\approx 1,50\%$
2	MLP-1-3-4-2-1	0,86%	$\approx 2,00\%$
3&4	MLP-1-5-7-3-1	1,63%	$\approx 2,50\%$
5	MLP-1-4-5-3-2-1	7,65%	$\approx \times 10\%$

Tabulka 2: Souhrn užitých *neuronových sítí* pro identifikaci volt-ampérové charakteristiky *memristoru* s použitím více *neuronových sítí* a jejich průměrných kvadratických relativních chyby rms a maximální relativní chyby δ_{max} .

Souhrn průměrných kvadratických relativních chyby rms a maximální relativní chyby δ_{max} pro jednotlivé oblasti včetně užitých *neuronových sítí* je uvedeno v tabulce 2.

Tato metoda byla navržena autorem tohoto textu, jak je uvedeno výše v 6. Některé dosažené výsledky byly publikovány v [13] a [3], charakteristika byla získána z [4] (Nature) a [36].

9 ZÁVĚR

Závěrem lze říci, že provedené experimenty potvrdily, že přesnost analytického modelu nemohou být lepší než cca v řádu procent. Zlepšení přesnosti těchto analytických modelů je možné a relativně jednoduché za pomoci neuronových sítí. Použitím „přímé“ neuronové sítě poskytuje procentuálně desetkrát větší přesnost, nicméně nejpřesnější výsledky má kombinace paralelní neuronové sítě s modifikovaným analytickým modelem. Byly provedeny různé experimenty s nejrůznějšími typy modelů a neuronových sítí (přímé modely, korekční a kombinované) na široké třídě vysokofrekvenčních prvků jako jsou například mikrovlnný varaktor, tranzistor pHEMT a memristor. Pro všechny typy

sítí byla spolehlivě zvládnut proces jejich učení pomocí systému naměřených dat a sestaven postup jak naučenou síť použít při analýze elektronických obvodů. Parametry analytického modelu, tak i hodnoty synaptických vah neuronové sítě je možno získat za použití optimalizačních metod. Na řadě experimentů, které zde byly představeny se ukazuje, že optimální struktura nemusí být nutně komplikovanou strukturou. Obecně jsou doporučované dvě vnitřní skryté vrstvy neuronové sítě s typicky 4–8 neurony na vrstvu. Na základě realizací mnoha systematicky generovaných experimentů byl formulován závěr, podle kterého lze většinu mikrovlnných aktivních prvků spolehlivě identifikovat neuronovými sítěmi s dvěma skrytými vrstvami, každá z těchto vrstev obsahuje typicky 4-8 neuronů. Tento námi dosažený výsledek je v dobré shodě s doporučením definovaným v nejnovějších publikacích členy týmu vůdčí osobnosti v této oblasti, prof. Q.J.Zhanga. Byla sestavena poloautomatická procedura pro nalezení optimálního počtu skrytých vrstev neuronové sítě a počtu neuronů v těchto vrstvách. Tato procedura byla ověřena na tranzistoru pHEMT a PJFET. Lze říci že takto navržená poloautomatická procedura vedla rychleji k výsledné optimální struktuře neuronové sítě než snaha o zautomatizování experimentálního přístupu hledání optimální (suboptimální) struktury neuronové sítě. Touto snahou se úlohu poněkud komplikuje, jak bylo uvedeno výše. Dále je nutné posuzovat použité model z hlediska jeho „celkového“ chování například průběhů charakteristik atd. Dále byla zpracována metodika korektivních sítí pracujících jako opravný prostředek modifikovaného analytického modelu s přesností pod jedno procento. Tento výsledek je zcela dostačující z hlediska požadavků na přesnost modelu pro účely simulace. Byla také navržena principiálně nová metodika použití systému více vzájemně spolupracujících neuronových sítí pro identifikaci komplikovaných prvků s výraznou hysterezí jakým je Pt – TiO_{2-x} – Pt memristor.

Některé dílčí výsledky této práce byly publikovány za pisatelova spolutorství ve velmi dobře impaktovaném časopise nakladatelství Elsevir Solid-State Electronics (IF=1,494 ve Web of Science), dále je pisatel spoluautorem článku v impaktovaném časopise Radioengineering (IF=0,503) a prvním spoluautorem článku v časopise s dobrým faktorem SNIP (Scopus normalized impact per paper) 1,061. Dále byly výsledky publikovány na odborných konferencích oboru Circuits and Systems, především MWSCAS (IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems. Některé obrázky a metody byly publikovány v knize Moderní radioelektronika. Časopis Radioengineering byl citován ve špičkovém časopise oboru Solid-State Electronics (kde bylo porovnání používaných modelů MESFET s řadou jiných modelů) a dále na konferenci IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology indexované v IEEE Xplore a rovněž v zahraniční disertační práci.

Reference

- [1] CADDEMI, A., AND DONATO, N. Advanced simulation of semiconductor devices by artificial neural networks. *Journal of Computational Electronics 2* (2003), 301–307.
- [2] CAO, J., WANG, X., LIN, F., NAKAMURA, H., AND SINGH, R. An empirical pHEMT model and its verification in PCS CDMA system. In *29th European Microwave Conference* (Munich, Oct. 1999), pp. 205–208.
- [3] CURTICE, W. R. GaAs MESFET modeling and nonlinear CAD. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 36 (Feb. 1988), 220–230.
- [4] D. B. STRUKOV, G. S. SNIDER, D. R. S., AND WILLIAMS, R. S. The missing memristor found. *Nature* 453 (May 2008), 80–83.
- [5] DOBEŠ, J. *Návrh vysokofrekvenčních a mikrovlnných obvodů počítačem*. Vydavatelství ČVUT, 2006.
- [6] DOBEŠ, J. C.I.A.—A comprehensive CAD tool for analog, RF, and microwave IC's. In *8th IEEE Int. Symp. High Performance Electron Devices for Microwave and Optoelectronic Applications* (Glasgow, Nov. 2000), pp. 212–217.
- [7] DOBEŠ, J., MÍCHAL, J., PAŇKO, V., AND POSPÍŠIL, L. Reliable procedure for electrical characterization of MOS-based devices. *Solid-State Electronics* 54, 10 (Oct. 2010), 1173–1184.
- [8] HAMMOUDA, H. B., MHIRI, M., GAFSI, Z., AND BESBES, K. Neural-based models of semiconductor devices for SPICE simulator. *American Journal of Applied Sciences* 5, 4 (2008), 385–391.
- [9] J. DOBEŠ, L. Enhancing the accuracy of microwave element models by artificial neural networks. *Radioengineering* 13, 3 (2004), 7–12.
- [10] J. DOBEŠ, L. Exclusive and corrective artificial neural networks for accurate modeling the rf semiconductor devices. In *Proceedings of the Third IASTED International Conference on Circuits, Signals, and Systems. Calgary: IASTED / Acta Press* (2005), IASTED / Acta Press, pp. 286–291.
- [11] J. DOBEŠ, L. Accurate modeling of the special microwave structures using artificial neural networks. In *The 13th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference - MELECON 2006 - Electronic Proceedings [CD-ROM]* (2006), Piscataway: IEEE, pp. 1–4.

- [12] J. DOBEŠ, L. Improving the accuracy of phemt models using corrective artificial neural networks. In *PIERS 2007 Prague - Proceeding od Progress In Electromagnetics Research Symposium [CD-ROM]* (2007), The Electromagnetics Academy, pp. 512–515.
- [13] J. DOBEŠ, L. Modeling special high frequency devices using artificial neural networks. In *Proceedings of the 2007 International Semiconductor Device Research Symposium [CD-ROM]* (2007), Piscataway: IEEE.
- [14] J. DOBEŠ, V. PAŇKO, L. Accurate gate-delay model for high speed digital and analog circuits. In *Proceedings of the 2008 IEEE Dallas Circuits And Systems Workshop (DCAS)* (2008), Piscataway: IEEE, pp. 46–49.
- [15] J. DOBEŠ, V. PAŇKO, L. Reliable procedure for electrical characterization of mos-based devices. In *Proceedings of 2009 International Semiconductor Device Research Symposium [CD-ROM]* (2009), Piscataway: IEEE.
- [16] J. DOBEŠ, L. POSPÍŠIL, V. P. Selecting an optimal structure of artificial neural networks for characterizing rf semiconductor devices. In *Proceedings of the 53rd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems* (2010), Piscataway: IEEE, pp. 1206–1209.
- [17] JASTRZEBSKI, A. K. Non-linear MESFET modeling. In *17th European Microwave Conference* (1987), pp. 599–604.
- [18] L.. POSPÍŠIL, J. DOBEŠ, A. Y. Accurate modeling of unusual electronic circuit elements with artificial neural networks. In *Proceedings of 2nd Conference on Circuits, Systems, Control, Signals* (2011), vol. 1, World Scientific and Engineering Academy and Society, pp. 150–155.
- [19] L.. POSPÍŠIL, J. DOBEŠ, A. Y. Characterization of electronic circuit elements by exclusive and corrective artificial neural networks. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation* 6, 1 (Jan. 2012), 136–143.
- [20] LI, X., GAO, J., AND BOECK, G. Microwave nonlinear device modeling by using an artificial neural network. *Semicond. Sci. Technol.* 21 (2006), 833–840.
- [21] L. POSPÍŠIL, J. D. Using the artificial neural networks for accurate rf devices modeling. In *AEE'05 - Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on: Applications of Electrical Engineering* (2005), WSEAS Press, pp. 139–143.

- [22] MADJAR, A. A fully analytical AC large-signal model of the GaAs MESFET for nonlinear network analysis and design. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 36 (Jan. 1988), 61–67.
- [23] MATEI, R., DIMA, G., AND PROFIRESCU, M. D. TCAD modeling using a neural network based approach. In *Modeling and Simulation of Microsystems* (2001), pp. 518–521.
- [24] MCCAMANT, A. J., MCCORMACK, G. D., AND SMITH, D. H. An improved GaAs MESFET model for SPICE. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 38 (June 1990), 822–824.
- [25] MEIJER, P. B. L. *Neural Network Applications in Device and Subcircuit Modelling for Circuit Simulation*. Met lit. opg., Proefschrift Technische Universiteit Eindhoven, Philips Research Laboratories in Eindhoven, Netherlands, 2003.
- [26] MEMON, N. M., AHMED, M. M., AND REHMAN, F. A comprehensive four parameters I – V model for GaAs MESFET output characteristics. *Solid-State Electronics* 51, 3 (Mar. 2007), 511–516.
- [27] MUNSHI, K., VEMPADA, P., PRASAD, S., SÖNMEZ, E., AND SCHUMACHER, H. Small signal and large signal modeling of HBT's using neural networks. *Microwave Review* 9, 2 (Dec. 2003), 31–34.
- [28] PARKER, A. E., AND SKELLERN, D. J. A realistic large-signal MESFET model for SPICE. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 45 (Sept. 1997), 1563–1571.
- [29] PEJČINOVIĆ, B. Personal communication at ICECS. Sep. 2002.
- [30] POSPÍŠIL, L. Zpřesňování analytických modelů vysokofrekvenčních tranzistorů neuronovou sítí. Master's thesis, ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra radioelektroniky, Květen 2004.
- [31] Q.J.ZHANG, AND K.C.GUPTA. *Neural Networks for RF and microwave design*. Artech Hous, 2000.
- [32] SIJERČIĆ, E., AND PEJČINOVIĆ, B. Comparison of non-linear MESFET models. In *9th IEEE Int. Conf. on Electronics, Circuits and Systems* (Dubrovnik, Sep. 2002), vol. III, pp. 1187–1190.
- [33] SMITH, D. H. An improved model for GaAs MESFETs. Tech. rep., TriQuint Semiconductors Corporation, 2000.

- [34] STATZ, H., NEWMAN, P., SMITH, I. W., PUCEL, R. A., AND HAUS, H. A. GaAs FET device and circuit simulation in SPICE. *IEEE Trans. Electron Devices* 34 (Feb. 1987), 160–169.
- [35] SUSSMAN-FORT, S. E., HANTGAN, J. C., AND HUANG, F. L. A SPICE model for enhancement- and depletion-mode GaAs FET's. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 34 (Nov. 1986), 1115–1119.
- [36] Z. BIOLEK, D. B., AND BIOLKOVÁ, V. Spice model of memristor with nonlinear dopant drift. *Radioengineering* 18, 2 (June 2009), 210–214.
- [37] ZHANG, Q. J., AND GUPTA, K. C. *Neural networks for RF and microwave design*. Artech House, Boston, 2000.

Přehled publikací Ladislav Pospíšila, Ing.

Reference

Seznam publikací vztahující se k disertaci

Publikace v impaktovaných časopisech

- [1] DOBEŠ, J., MÍCHAL, J., PAŇKO, V., AND POSPÍŠIL, L. Reliable procedure for electrical characterization of MOS-based devices. *Solid-State Electronics* 54, 10 (Oct. 2010), 1173–1184. (Web of Science IF = 1,493) **25%**
- [2] J. DOBEŠ, L. POSPÍŠIL Enhancing the accuracy of microwave element models by artificial neural networks. *Radioengineering* 13, 3 (2004), 7–12. (Web of Science IF = 0,503) **50%**

Publikace v recenzovaných časopisech

- [3] L. POSPÍŠIL, J. DOBEŠ, A. YADAV Characterization of electronic circuit elements by exclusive and corrective artificial neural networks. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation* 6, 1 (Jan. 2012), 136–143. (Scopus normalized impact per paper IF = 1,061) **33%**

Publikace excerptované WOS

- [4] DOBEŠ, J., MÍCHAL, J., PAŇKO, V., AND POSPÍŠIL, L. Reliable procedure for electrical characterization of MOS-based devices. *Solid-State Electronics* 54, 10 (Oct. 2010), 1173–1184. (Web of Science IF = 1,493) **25%**
- [5] J. DOBEŠ, L. POSPÍŠIL, V. PAŇKO Selecting an optimal structure of artificial neural networks for characterizing rf semiconductor devices. In *Proceedings of the 53rd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems* (2010), Piscataway: IEEE, pp. 1206–1209. **50%**
- [6] J. DOBEŠ, V. PAŇKO, L. POSPÍŠIL Accurate gate-delay model for high speed digital and analog circuits. In *Proceedings of the 2008 IEEE Dallas Circuits And Systems Workshop (DCAS)* (2008), Piscataway: IEEE, pp. 46–49. **33%**

- [7] J. DOBEŠ, L. POSPÍŠIL Improving the accuracy of phemt models using corrective artificial neural networks. In *PIERS 2007 Prague - Proceeding od Progress In Electromagnetics Research Symposium [CD-ROM]* (2007), The Electromagnetics Academy, pp. 512–515. **50%**
- [8] J. DOBEŠ, L. POSPÍŠIL Modeling special high frequency devices using artificial neural networks. In *Proceedings of the 2007 International Semiconductor Device Research Symposium [CD-ROM]* (2007), Piscataway: IEEE. **50%**
- [9] J. DOBEŠ, L. POSPÍŠIL Accurate modeling of the special microwave structures using artificial neural networks. In *The 13th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference - MELECON 2006 - Electronic Proceedings [CD-ROM]* (2006), Piscataway: IEEE, pp. 1–4. **50%**
- [10] J. DOBEŠ L. POSPÍŠIL Using the artificial neural networks for accurate rf devices modeling. In *AEE'05 - Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on: Applications of Electrical Engineering*, pages 139–143. WSEAS Press, 2005. **50%**
- [11] J. DOBEŠ, L. POSPÍŠIL Exclusive and corrective artificial neural networks for accurate modeling the rf semiconductor devices. In *Proceedings of the Third IASTED International Conference on Circuits, Signals, and Systems. Calgary: IASTED / Acta Press* (2005), IASTED / Acta Press, pp. 286–291. **50%**
- [12] J. DOBEŠ, L. POSPÍŠIL Enhancing the accuracy of microwave element models by artificial neural networks. *Radioengineering* 13, 3 (2004), 7–12. **50%**

Patenty

Autor žádné nemá.

Publikace ostatní

- [13] L.. POSPÍŠIL, J. DOBEŠ, A. YADAV Accurate modeling of unusual electronic circuit elements with artificial neural networks. In *Proceedings of 2nd Conference on Circuits, Systems, Control, Signals* (2011), vol. 1, World Scientific and Engineering Academy and Society, pp. 150–155. **33%**

Seznam ostatních publikací

Publikace v impaktovaných časopisech

Autor žádné nemá.

Publikace v recenzovaných časopisech

Autor žádné nemá.

Publikace excerpované WOS

Autor žádné nemá.

Patenty

Autor žádné nemá.

Publikace ostatní

- [14] DUŠEK, K. - POSPÍŠIL, L. - JEŽDÍK, P. - BREJCHA, M Technologické vybavení laboratoří LVR na FEL ČVUT v Praze. In *DPS Plošné spoje od A do Z* 2011, vol.1, 2011, no. 3, p. 8-9. ISSN 1804-4891. **25%**

Citované publikace

- [15] DOBEŠ, J., MÍCHAL, J., PAŇKO, V., AND POSPÍŠIL, L. Reliable procedure for electrical characterization of MOS-based devices. *Solid-State Electronics* 54, 10 (Oct. 2010), 1173–1184. (Web of Science IF = 1,493) **25%**

je citovaný v

MEMON, N.M., AHMED, M.M, REHMAN, F. A Comprehensive Four Parameters I-V model for GaAs MESFET Output Characteristics. *SOLID-STATE ELECTRONICS*, 2007, vol. 51, no. 3, pp. 511–516. (Web of Science IF = 1,493)

a také citovaný v

MEMON, N.M., AHMED, M.M, REHMAN, F. Comparison of Nonlinear I - V Models for Submicron GaAs MESFET's Characteristics. In Proc. of 8th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology, Shanghai 2006, pp. 896–898. (IEEE Xplore 04098269)

a rovněž citovaný v

MEMON, N.M. Modeling Techniques of Submicron GaAs MESFETs and HEMTs. Ph.D. Thesis, Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering and Applied Sciences, Muhammad Ali Jinnah University, Islamabad.

(článek je tedy celkem citovaný třikrát)

SUMMARY

At present, there are many various microwave structures for which their nonlinear models for CAD are necessary. However, in the recent SPICE (PSpice) family programs, only a class of five types of MESFET model is available. In the thesis, a method is suggested for modeling miscellaneous microwave structures by exclusive neural networks or by corrective neural networks working attached to a modified analytic model. An accuracy of the proposed modification of the analytic model is assessed by extracting model parameters of the GaAs MESFET, AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT, and GaAs microwave varactors. An accuracy of procedures with neural networks is assessed by extracting their parameters in static and dynamic domains. First, an approximation of the AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT output characteristics is carried out by means of both exclusive and corrective artificial neural networks; and second, an approximation of the capacitance function of the SACM InGaAs/InP avalanche photodiode is performed by the exclusive neural network. A systematic sequence of analyses is also performed for examining an optimal structure of the artificial neural network from the point of view its structure and complexity. The tests have been performed on both five- and four-layer artificial neural networks that serve for modeling a P-channel JFET and AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT. Further, the Pt-TiO_{2-x}-Pt memristor characteristic with an extraordinary (but typical) hysteresis is approximated by a set of cooperative artificial neural networks, because a single network is unable to characterize this especial element. Last, a sequence of systematic experiments is performed, which shows that the optimal structure of the network can be found relatively easily, and it should not be too complicated. Our developed models using artificial neural networks were compared with existing analytical models (Curtice,

Statz, Susman, and TOM TOM2 [TriQuint]). In addition, we are working a model of pHEMT transistor (working up to frequency 110GHz) using only exclusive neural network. The characteristics of this transistor was measured in Bologna, Italy, which is one of the few centers in Europe (Dr. Svevo Monacovi, MEC, University of Bologna a University of Ferrara), able to perform this measurement.

RESUMÉ

V současné době existuje mnoho různých mikrovlnných struktur, pro které je potřebné mít jejich nelineární modely do systémů CAD. Bohužel v moderních programech třídy SPICE (PSpice) je k dispozici pouze pět typů modelů tranzistorů MESFET. V této práci je popsána metoda pro modelování různých mikrovlnných struktur s použitím neuronové sítě, nebo s použitím kombinace analytického modelu a korekční neuronové sítě, která tento analytický model koriguje a také užití několika neuronových sítí. Přesnost navrhované modifikace analytického modelu je posuzována vzhledem k získaným parametrům modelu GaAs MESFET tranzistoru, AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT tranzistoru, a GaAs mikrovlnného varaktoru. Za použití neuronové sítě bylo provedeno zpřesnění analytického modelu jak v jeho statické tak i dynamické části. Nejprve byla provedena aproximace výstupních charakteristik AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT tranzistoru za použití pouze jedné neuronové sítě, poté byla použita i korekční neuronová síť. Také byla provedena aproximace závislosti kapacity SACM InGaAs/InP lavinové fotodiody, opět za použití pouze jedné neuronové sítě. Dále byla experimentálně provedena systematická analýza pro získání optimální struktury neuronové sítě a optimálního počtu neuronů v jednotlivých vrstvách této neuronové sítě. Experimenty byly provedeny na neuronových sítích se čtyřmi a pěti vrstvami, které modelovaly P-kanálový tranzistor JFET a AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT tranzistor. Dále, charakteristika Pt-TiO_{2-x}-Pt memristoru, která vykazuje své typické hysterezi chování, které je pro ni typické je aproximován několika neuronovými sítěmi, protože jediná síť není schopna charakterizovat tento speciální prvek. Poslední provedené systematické experimenty ukazují, že optimální strukturu sítě lze nalézt poměrně snadno, a nemělo by to být příliš složité. Námi vytvořené modely využívající umělé

neuronové sítě byly porovnány s dosavadními analytickými modely (Curtice, Statz, Susman, TOM a TOM2 [TriQuint]). Dále se pracuje na modelu vysokofrekvenčního tranzistoru pHEMT (pracující do frekvence 110GHz) s využitím pouze jedné neuronové sítě. Charakteristiky k tomuto tranzistoru byly změřeny v italské Bologni (Dr. Svevo Monacovi, MEC, University of Bologna a University of Ferrara), což je jedno z mála pracovišť v Evropě schopno provést měření na takto vysokých frekvencích.