

B. ZAJC, M. VEHOVEC
Fakulteta za elektrotehniko,
Ljubljana

REFERAT

UPORABA OPTIMIZIRANIH NELINEARNIH MODELOV IN NJIHOVA
EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA

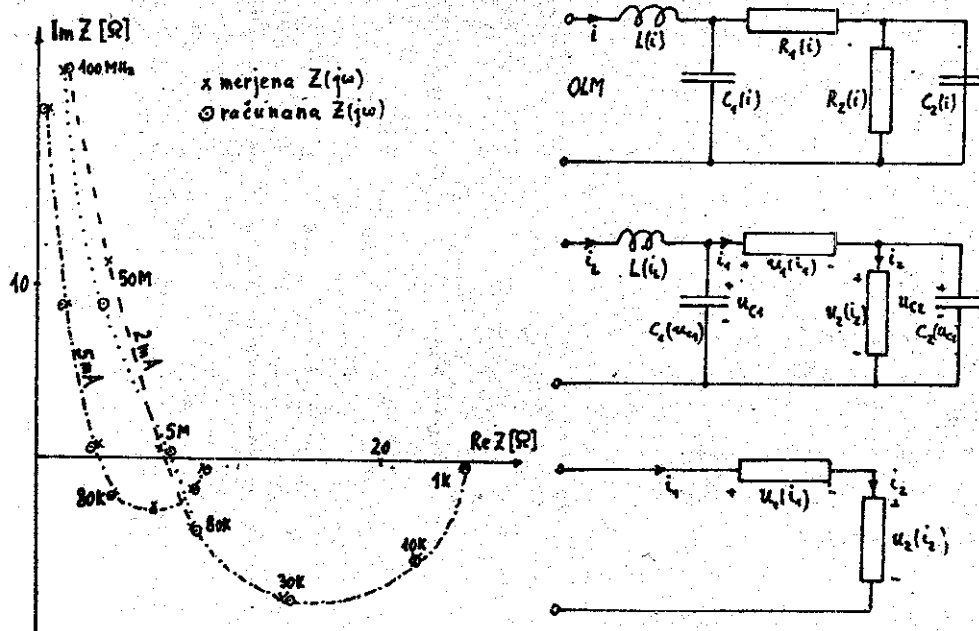
VSEBINA - Za razne diode so predstavljeni njihovi dinamični nelinearni modeli, identificirani na osnovi metode, katere teoretične osnove so bile podane na predhodnjih konferencah. Z rezultati hočemo podpreti teorijo, prikazati nelinearne odvisnosti posameznih elementov v modelih in govoriti o težavah zlasti pri meritvah, ki postopek identifikacije dinamičnih nelinearnih modelov spremljajo. Poleg tega so ti modeli uporabljeni za določanje odzivov pri krmiljenju s signali velikih amplitud in ti odzivi primerjani z merjenimi in tako tudi eksperimentalno verificirani. Izkaže se da je pri natančnejšem modeliranju diode običajni nelinearni paralelni RC kombinaciji potrebno dodati še druge RLC elemente, kjer je vsak teh elementov zelo nelinearen in gotovo ne predstavlja stresanih kapacitivnosti, oziroma induktivnosti priključkov.

ABSTRACT - Dynamic nonlinear models are derived for various diodes. These models are synthesized using the previously reported method. The purpose of this report is to demonstrate applicability of the method, to show nonlinear branch relations in models and to emphasize measurement problems which accompany the procedure of identification of dynamic nonlinear models. The derived models are used for calculation of responses under large signal excitations and calculated results are compared with measured ones. It can be shown that for accurate modelling of a diode nonlinear resistor and capacitor in parallel are not sufficient; other elements with highly nonlinear characteristics that certainly do not represent parasitic capacitances or inductances must be added.

1. UVOD

Na predhodnjih konferencah smo predlagali metodo modeliranja nelinearnih fizikalnih dvopolov [1] in njene teoretične osnove: metoda je bila formulirana topološko [2], poleg tega pa so bile dane tudi omejitve pri modeliranju [3]. Modeliranje te vrste ustreza postopku identifikacije dinamičnega nelinearnega modela za dani nelinearni fizikalni dvopolni element. Pri tem identifikacija vejskih relacij posameznih elementov modela sloni na meritvah z malimi harmoničnimi signali, ki jih lahko opravimo le na dostopnem vhodu elementa. Zato bodo identificirani najprej linearni modeli v množici delovnih točk in šele nato iz njih sintetiziran nelinearni model elementa.

Da bi preizkusili izvedeno teorijo in prikazali uporabnost takega modeliranja na praktičnem primeru ter ocenili njegove prednosti, bomo na tem mestu predstavili opti-



Slika 1: a) Merjena in optimizirana frekvenčna poteka inkrementalne impedanace diode BY-235 za 2 in 5 mA. b) Topologija odvisnega linearnega modela (OLM). c) Oblika dinamičnega nelinearnega modela (DNM). d) Resistivni del dinamičnega nelinearnega modela (RNM)!

mizirane nelinearne modele dveh diod BY-235 (Iskra) in 1N1096 (Texas Instruments) ter ene Zenerjeve diode ZK-3.9 (ITT). Poleg tega bomo uporabili omenjeni model diode BY-235 za študij odzivov pri krmiljenju s signali velikih amplitud. Za model bomo izračunali napetostni odziv, nato pa ga primerjali z merjenim napetostnim odzivom na obravnavani diodi pri vzbujanju s sinusnim tokom velike amplitude. Seveda bomo primerjavo ponavljali pri raznih frekvencah.

2. IDENTIFIKACIJA LINEARNIH MODELOV

Za vse tri diode smo z vektorskima impedančnima merilnikoma HP4800 v frekvenčnem območju do 500 kHz in HP4815 v frekvenčnem območju od 500 kHz do 108 MHz izmerili frekvenčni potek inkrementalne impedance v raznih delovnih točkah v prevodni smeri.

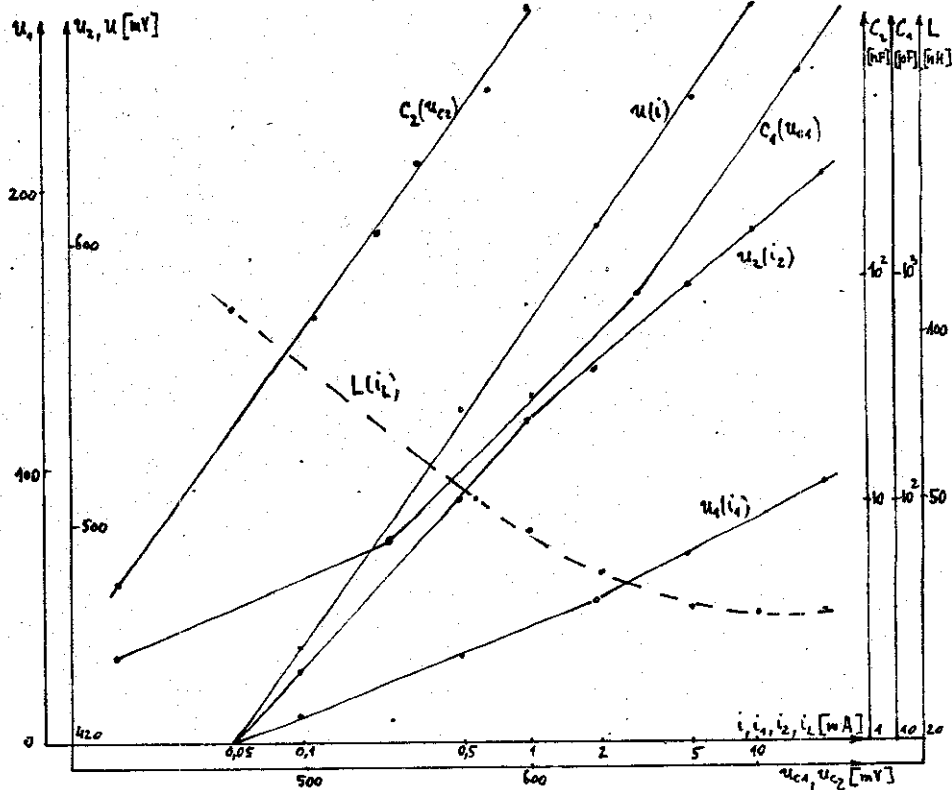
Tabela 1: optimizirani OLM

I (mA)	u_m (mV)	R_1 (Ω)	R_2 (Ω)	C_1 (pF)	C_2 (nF)	L (nH)		
0.05	420	210	775	25	5,5	130	BY-235	
0.1	446	155	341					
0.5	516	25	89	80	82	57		
1.0	548	15	36		198	48		
2	581	8.15	16.7	360	400	40.5		
5	623	3.6	6.3	1000	850	34		
10	655	1.9	2.9		1950	34		
20	686	1.02	1.41	10000	2850	35		
0.05	419	80	650	100	2.1	30		1N1096
0.1	447	45	345	0.7	5	5		
0.5	519	12	89	8	45	10		
1.0	557	7	44	100	98	15		
2	593	5	21	700	245	25		
5	636	1.6	8.2	10	490	5		
10	670	1.4	3.6	3000	1300	8.4		
0.025	1670	0.5	8000		1.1	40	ZX-3.9	
0.1	1950	0.5	2435		2.1	40		
0.25	2120	0.5	1206		2.5	40		
1	2490	0.5	310		2.5	40		
3	2800	0.5	117		2.5	40		
5	2970	0.5	68		2.5	40		
10	3210	0.5	33.4		2.5	40		
20	3440	0.5	16.5		2.5	40		
60	3850	0.5	6.45		2.5	40		

Za diodo BY-235 sta za primer prikazana dva taka poteka za dve delovni točki, nastavljeni s tokovoma 2 in 4 mA na sliki 1a.

Ker fizikalno delovanje diode dobro poznamo, bomo predpostavili topologijo linearnih modelov (sl. 1b), ki naj podajajo lastnosti diode pri vzbujanju z majhnimi harmoničnimi

signali v določenih delovnih točkah, na osnovi fizikalnega modela. Tako ima vezje samo 5 elementov za celotno predvideno frekvenčno območje. Sedaj bomo te linearne modele glede na merjene impedančne potoke v vsaki delovni točki posebej optimizirali. Pri tem z ugotavljanjem občutljivosti elementov modela računalnik sam poišče gradient pomika v prostoru elementov za novo iteracijo optimizacije. Postopek se tako približuje željenim merjenim specifikacijam. V sliki 1a se optimiziran potek prilega merjenemu poteku impedance v obeh primerih. Rezultati množice optimizacij v množici delovnih točk so zbrani v tabeli 1, kjer ena vrsta v tabeli ustreza odvisnemu linearnemu modelu za določeno delovno točko. Uporabljeni optimizacijski postopki so bili izdelani v eni predhodnjih raziskav linearnih aktivnih vezij [4] na naši ustanovi.



Slika 2: Odvisnosti elementov DNM

Tabela 2: Elementi DNM (tokovi v mA in napetosti v mV)

$i=i_1=i_2=i_L$	u_m	u_1	$u_2=u_{C2}$	$u=u_{C1}$	C_1 (pF)	C_2 (nF)	L (nH)
0.05	420	0	420	420	25	5.5	130 BY-235
0.1	446	8.9	445	454			
0.5	516	31.3	508	540	80	82	57
1	548	40.9	536	577		198	48
2	581	51.69	553	605	360	400	40.5
5	623	67.4	583	650	1000	850	34
10	655	80.2	604	684		1950	34
20	686	93.9	624	718	10000	2850	35
0.05	419	0	419	419	100	2.1	30 1N1096
0.1	447	2.9	442	445	0.7	5	5
0.5	519	11.3	505	517	8	45	10
1	557	15.8	536	552	100	98	15
2	593	21.1	566	587	200	245	25
5	636	29.9	604	634	700	490	5
10	670	38.5	630	669	1000	1300	8.4
0.025	1670	0	1670	1670		1.1	40 BZ-3.9
0.1	1950	0.04	1976	1976		2.1	40
0.25	2120	0.11	2224	2224		2.5	40
1	2490	0.49	2648	2648		2.5	40
3	2800	1.49	2835	2837		2.5	40
5	2970	2.5	3012	3015		2.5	40
10	3210	5.0	3246	3251		2.5	40
20	3440	10	3476	3486		2.5	40
60	3850	30	3869	3899		2.5	40

3. SINTEZA DINAMIČNEGA NELINEARNEGA MODELA

Izhodišče sinteze so odvisni linearni modeli (OLM) z dano topologijo (sl. 1b) z dani vrednostmi elementov (tabela 1). Iz tabele lahko dobimo tudi potek $R(i) = R_1(i) + R_2(i)$, ki predstavlja diferencialno upornost statične karakteristike diode.

Metoda sinteze DNM [1,2] predvideva najprej sintezo resistivnega dela nelinearnega modela (RNM). Pri tem je potrebno za izračun statične u-i karakteristike integrirati funkcijo $R(i)$, prav tako pa integrirati tudi $R_1(i)$ in $R_2(i)$, da dobimo odvisnosti $u_1(i)$ in $u_2(i)$. Ker je smiselno opraviti meritve inkrementalne impedance diode le pri manjšem številu delovnih točk, imamo po optimizaciji za $R(i)$, $R_1(i)$ in $R_2(i)$ na razpolago razmeroma malo podatkov kar se tiče natančnosti pri integriranju teh funkcij. Zato preko takih redkih podatkov aproksimiramo neko funkcijo: v našem primeru se podatkom lepo prilagodi tako hiperbola $R(i) = 1/(a_0 + a_1 i)$, kot potenčna odvisnost $R(i) = a i^b$. Parametre a_0 , a_1 ali a, b dobimo, če zapišemo uporabljeno aproksimacijsko enačbo v dveh sosednjih točkah za i_k in i_{k+1} ter $R(i_k)$ in $R_{k+1} = R(i_{k+1})$. Izbrali smo potenčno aproksimacijsko funkcijo in jo integrirali preko tabelarnih podatkov za $R_1(i)$, $R_2(i)$ in $R(i)$.

rezultati $u_1(i)$, $u_2(i)$ in $u(i)$ pa so zbrani v tabeli 2.

Za sintezo RNM sta nadalje potrebni posredni odvisnosti $i_1(i)$ in $i_2(i)$, oziroma splošno $x_j(g)$, kjer x_j predstavlja vejsko spremenljivko: napetost ali tok v j -ti veji, medtem ko g predstavlja pritisnjeno napetost ali vsiljen tok na vходу elementa, torej vzbujevalno veličino, ki nastavi delovno točko. To odvisnost dobimo, če analiziramo RNM (sl. 1d), nakar je potrebno invertirati dobljene funkcije $x_j(g)$ v obliko $g(x_j)$. Kdaj je taka funkcija invertibilna smo razpravljali pri teoretični obravnavi metode [3]. V našem primeru imajo odzivi v posameznih vejah RNM na enosmerno vzbujanje i zelo enostavno odvisnost $i_1 = i_2 = i$, tako da odvisnosti $u_1(i)$ in $u_2(i)$ že predstavljajo željene vejske relecije $u_1(i_1)$ in $u_2(i_2)$ (sl. 2 in tabela 2), pri čemer invertiranje prav zaprav odpade. V tabeli se nahaja tudi izračunana statična karakteristika elementa.

V drugem delu sinteze moramo resistivni osnovi nelinearnega modela določiti še dinamične elemente: kapacitivnosti in induktivnosti. Ker je topologija nelinearnega modela identična topologiji OLM, vemo kje se bodo nahajali dinamični elementi, medtem ko njihove osnovne podatke $C_1(i)$, $C_2(i)$ in $L(i)$ črpamo iz množice OLM v tabeli 1. Iz analize vezja izvemo, da je $u_{C1} = u(t)$, $u_{C2} = u_2(i)$ in $i_L = i$, zato iz odvisnosti $C_1(i)$, $C_2(i)$ in $L(i)$ dobimo $C_1(u_{C1})$, $C_2(u_{C2})$ ter $L(i_L)$ (tabela 2 in sl. 2), ki združujejo pri tvorbi enačb stanja, sicer pa lahko dobimo tudi karakteristike $q_1(u_{C1})$, $q_2(u_{C2})$ in $\psi(i_L)$, če integriramo $C_1(u_{C1})$, $C_2(u_{C2})$ in $L(i_L)$.

4. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA DNM

Verifikacijo dobljenega DNM pri krmiljenju s signali velikih amplitud naredimo s primerjavo izračunanega napetostnega odziva na vzbujanje $i(t) = 5 + 4 \sin(\omega t + \varphi)$ in $\varphi = 30,42^\circ$ z merjenim napetostnim odzivom na diodi BY-235 na izbrani sinusni tok pri različnih frekvencah. DNM na sliki 1c ima naslednje enačbe stanja

$$u_{C1} = (i(t) - i_1(u_{C1} - u_{C2})) / C_1 \quad \dots\dots$$

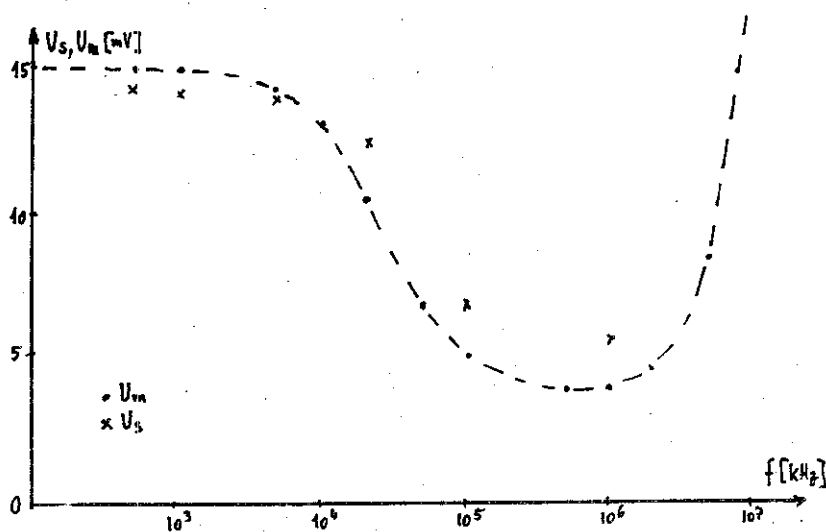
$$u_{C2} = (i_1(u_{C1} - u_{C2}) - i_2(u_{C2})) / C_2 \quad \dots\dots$$

$$i_L = i(t) / L \quad \dots\dots$$

Do frekvence 1MHz se izkaže, da je $u_L(t)$ zanemarljivo majhna. Zato tretjo enačbo (ki jo sicer lahko vedno ločeno integriramo) izpustimo in vzamemo $u(t) = u_{C1}(t)$. Poleg tega pri Eulerjevi metodi za numerični postopek integracije enačb stanja določa največji korak najmanjša časovna konstanta vezja, zato je pri nizkih frekvencah do 20 kHz potrebno zelo veliko število korakov na eno periodo. Vendar je v tem področju i_{C1} v primerjavi z i_1 zanemarljivo majhen, zato tam element C_1 in prvo enačbo izpustimo.

Poteka $i_1(u_1)$ in $i_2(u_2)$ (sl. 2) aproksimirano z dvema, $C_1(u_{C1})$ s tremi in $C_2(u_{C2})$ z enim eksponentnim potekom.

S pomočjo računalniške analize smo pri izbranih frekvencah izračunali odzive $u_i(\omega t)$, za katere nato izračunamo še srednje vrednosti U_s v času pozitivnih polperiod. Ker so cevni voltmetri umerjeni na efektivno vrednost napetosti za sinusno obliko, moramo odčitek deliti z $\pi/\sqrt{2}$, da tudi za merjeno veličino dobimo srednjo vrednost U_m na diodi. Računani odziv U_s in merjeni odziv U_m primerjamo v sliki 3.



Slika 3: Primerjava računane in merjene odziva pri vzburjanju z velikimi signali

Iz primerjave vidimo, da med odzivom v DNM in izmerjenim odzivom sicer nastopajo določene razlike, vendar pa je kvalitativen potek $U_s(f)$ pravilen. Zavedati se namreč moramo, da je dobljen $U_s(f)$ na osnovi meritev inkrementalne impedance, kjer lahko nastopijo določene merilne napake, prav tako pa tudi pri določitvi $U_m(f)$ lahko nastopijo precejšnje napake. Pri izvedenem postopku modeliranja bi bilo potrebno natančno ugotoviti vzrok odstopanja, kar pa bi zahtevalo večje izkušnje pri uporabi predlagane metode po eni strani, po drugi strani pa temeljito preverjanje točnosti uporabljenih merilnih instrumentov, še posebej vektorskega impedančnega merilnika. Kljub temu smo z rezultati lahko zadovoljni. Če bi uporabili na tem mestu diodni model SCEPTRE bi pri vzburjanju s tokovi višjih frekvenc dobili na diodi napetost, ki bi ustrezala padcu na serijski upornosti, ki je za usmerniško diodo BY-235 v razredu 0,2 in bi pri 1 MHz značala izračunana vrednost $U_s = 0,36$, kar je precej manj od izračunane $U_s = 5,49$ za DNM in merjene $U_m = 3,78$ mV. Iz dobljenih rezultatov lahko zaključimo, da je potek $i_1(u_1)$

dejansko zelo nelinearen in sicer pri večjih tokovih diferencialna upornost te resistivne veje upada.

5. ZAKLJUČEK

Diodni model SCEPTRE vsebuje poleg $i_2(u_2)$ in $C_2(u_{C2})$ še serijsko upornost $R_1 = \text{konst}$, medtem ko smo v našem primeru ugotovili, da je na tem mestu navzoča nelinearna vejska relacija $i_1(u_1)$ s približno eksponencialnim potekom. Poleg tega se nahaja v našem DNM za diodo BY-235 tudi kapacitivnost $C_1(u_{C1})$, ki je bistveno nelinearen element in ne more ustrezati stresani kapacitivnosti ohišja in priključkov diode. Nelinearni potek $u_1(i_1)$ in $C_1(u_{C1})$ si razlagamo takole: pri natančnejšem modeliranju diode ne zadostuje le ena RC sekcijska, sestavljena iz elementov $i_2(u_2)$ in $C_2(u_{C2})$ v DNM, temveč je potrebno vključiti dodatna nelinearna elementa $u_1(i_1)$ in $C_1(u_{C1})$. Poleg tega iz nelinearnosti $L(i_L)$ sklepamo, da induktivnost v DNM ni stresana induktivnost priključkov.

Literature:

- 1) B. Zajc, M. Vehovec: "Sinteza nelinearnih dinamičnih modelov", Zbornik XIX konference ETAN v Ohridu 1975, str. 179 - 186.
 - 2) B. Zajc, M. Vehovec: "Topološka formulacija identifikacije nelinearnih dvopolov", Zbornik XX. konference ETAN v Opatiji 1976, str. 263 - 270.
 - 3) M. Vehovec, B. Zajc: "Omejitve pri identifikaciji nelinearnih dvopolov", Zbornik XX. konference ETAN v Opatiji 1976, str. 297 - 304.
 - 4) M. Vehovec, L. Gyergyek, B. Bedjanič, B. Štemberger: "Optimizacija linearnih aktivnih vezij", znanstveno raziskovalna naloga št. 2-781/132-73 pri Skladu B. Kidričev v Ljubljani 1975.
-