

## VAŽNOST PRIMENE PRECIZNOG NESTACIONARNOG MOSFET MODELA ZA SIMULACIJU CMOS ANALOGNIH INTEGRISANIH KOLA

Tatjana Pešić, Nebojša Janković, *Elektronski fakultet u Nišu*

**Sadržaj** – U radu je opisan novi kompaktni nestacionarni (NS) model MOSFET-a baziran na ekvivalentnom nelinearnomvodu kojim se modeluje konačno vreme transporta nosilaca kroz kanal. Novi model je implementiran u programu SPICE i korišćen za simulaciju amplitudske i fazne karakteristike naponskog pojačanja CMOS operacionog pojačavača. Poređenjem sa rezultatima precizne numeričke fizičko/električne (mixed-mode) simulacije, pokazano je da primena novog NS MOSFET modela dovodi do uspešnog predviđanja granične frekvencije i margine stabilnosti naponskog pojačanja operacionog pojačavača. Za razliku od novog modela, primena standardnih BSIM3 modela daje značajno neslaganje SPICE simulacije sa rezultatima mixed-mode analize.

### 1. UVOD

Svi do sada razvijeni kompaktni modeli za MOS tranzistore mogu se podeliti u dve grupe, kvazistacionarne (KS) i nestacionarne (NS). Kod kvazistacionarnih modela, pretpostavljeno je da raspodela naelektrisanja unutar tranzistora ima trenutni odziv na vremensku promenu polarizacije kontakata, a da sama raspodela ne sadrži eksplicitno i vremensku zavisnost. Mada veoma precizni pri nižim frekvencijama rada tranzistora, kvazistacionarni kompaktni modeli nerealistično opisuju ponašanje komponenti u okolini graničnih frekvencija [1,2] što dovodi do grešaka u predviđanju odziva samog integrisanog kola, kao i grešaka u određivanju faze što može da bude značajno kod određivanja fazne margine i stabilnosti pojačavača. Greška simulacije je naročito velika kod tranzistora sa dugim kanalima ili kod brzih prelaznih režima, kada je vreme promene ulaznog signala reda veličine srednjeg vremena prolaska naelektrisanja kroz tranzistor.

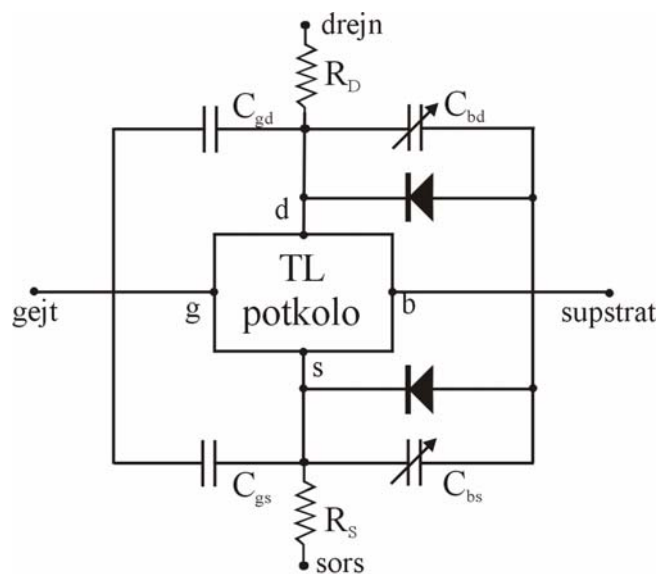
Zbog navedenih nedostataka kvazistacionarnih kompaktnih modela MOS tranzistora, u poslednjih par godina pojavio se veliki broj radova u naučnoj literaturi sa težnjom da se razviju nestacionarni kompaktni modeli MOSFET-a kojima bi se tačnije predvidele karakteristike analognih integrisanih kola za visokofrekventne aplikacije. Najveći broj predloženih modela razvijen je ili za primenu u vremenskom ili za primenu u frekventnom domenu, što može uzrokovati nekonzistentne rezultate simulacija pri analizi rada tranzistora. Određen broj nestacionarnih modela izveden je modifikacijom odgovarajućih kvazistacionarnih modela kako bi se uračunali i nestacionarni efekti. Na primer, u najčešće korišćenom modelu za MOS tranzistor, BSIM3 modelu [3], nestacionarni efekti uzeti su u obzir dodavanjem pomoćnog kola za kašnjenje. Problem ovog pristupa je, međutim, što se parametri za podešavanje ovog kola razlikuju u zavisnosti od toga da li tranzistor radi u linearnoj oblasti ili zasićenju, pa se koristi kompromisna vrednost čime se smanjuje tačnost modela [4].

U ovom radu će biti primenjen novi fizički baziran nestacionarni model MOSFET-a koji efikasno i suštinski uključuje konačno vreme transporta nosilaca kroz kanal. Na

osnovu rezultata simulacije jednog kompenzovanog CMOS operacionog pojačavača, biće pokazano da jedino pod uslovom tačnog modeliranja nestacionarnih efekata u kanalima CMOS tranzistora mogu da se odrede precizne vrednosti RC povratne grane za stabilizaciju pojačavača.

### 2. OPIS NESTACIONARNOG MOSFET MODELA

Na Sl. 1 prikazano je osnovno ekvivalentno kolo novog NS MOSFET modela koji je implementiran u simulatoru električnih kola SPICE [5]. Kolo se sastoji od kapacitivnosti preklapanja gejta sa drejnom i sorsom  $C_{gd}$  i  $C_{gs}$ , difuzionih kapacitivnosti spojeva, otpornosti tela sorsa i drejna  $R_S$  i  $R_D$  i jednog potkola (označenog sa TL) čija je šema prikazana na Sl. 2.

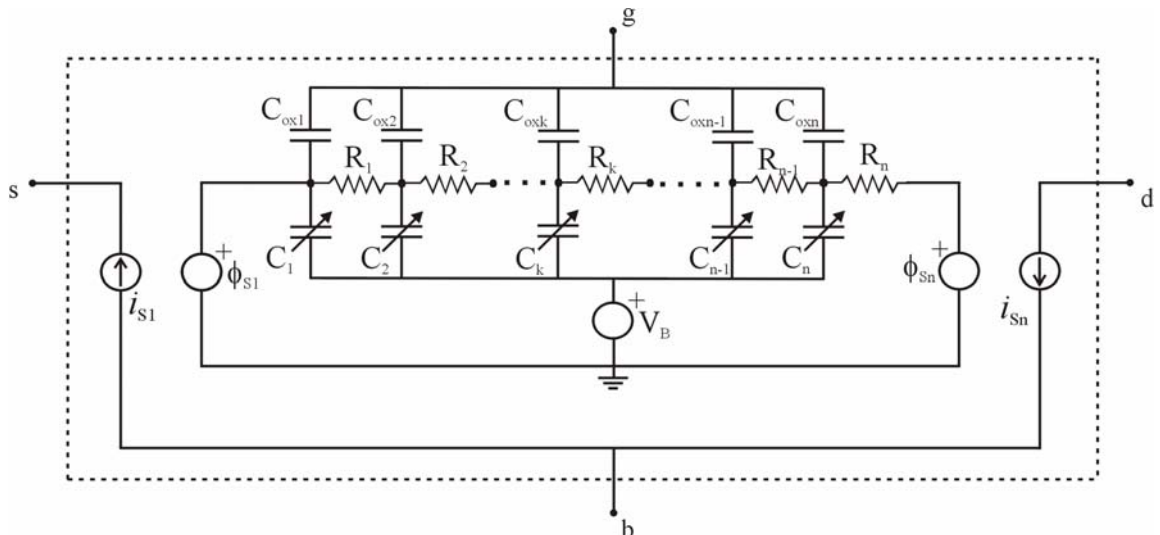


Sl.1. NS model MOSFET-a za primenu u SPICE-u.

TL kolo se sastoji od ekvivalentnog  $n$ -segmentnog nelinearnog RC voda i strujom kontrolisanih strujnih izvora  $i_{S1}$  i  $i_{Sn}$  koji preslikavaju struje kroz naponske generatore  $\phi_{S1}$  i  $\phi_{Sn}$ . Vrednosti naponskih generatora su određene graničnim vrednostima površinskih potencijala u kanalu na strani sorsa i drejna, respektivno. Elementi ćelije ekvivalentnog voda  $C_{okk}$ ,  $C_k$  and  $R_k$  ( $k=1 \div n$ ) predstavljaju redom kapacitivnost oksida gejta, nelinearnu kapacitivnost kanala u odnosu na supstrat i nelinearnu otpornost kanala. Njihove vrednosti se računaju izrazima datim u [6,7].

Površinski potencijali  $\phi_{S1}$  i  $\phi_{Sn}$  su povezani sa naponima polarizacije  $V_{GB}$  i  $V_{DS}$  sledećim rekurentnim relacijama [8]:

$$\phi_{S1} = 2\phi_f + V_t \ln \left[ \frac{1}{V_t} \left\{ \frac{1}{\gamma_0^2} (V_{GB} - V_{fb} - \phi_{S1})^2 - \phi_{S1} \right\} \right], \quad (1)$$



Sl.2. Šema TL potkola.

$$\phi_{Sn} = 2\phi_f + V_{DS} + V_t \ln \left[ \frac{1}{V_t} \left\{ \frac{1}{\gamma_0^2} (V_{GB} - V_{fb} - \phi_{Sn})^2 - \phi_{Sn} \right\} \right], \quad (2)$$

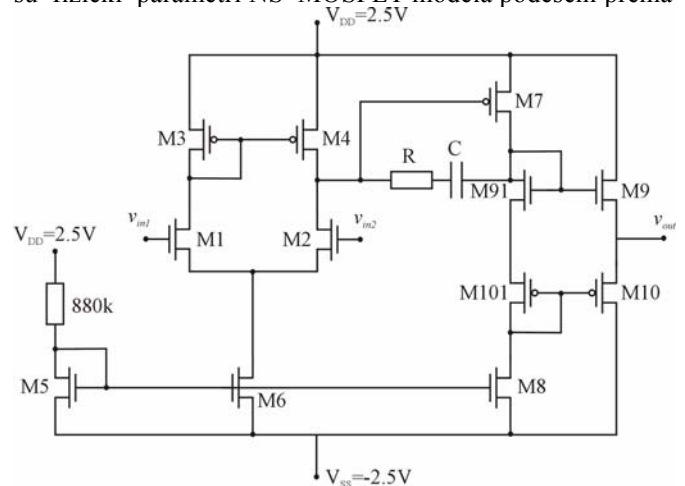
gde je  $V_t$  termički napon,  $\phi_f = V_t \ln(N_{ch}/n_i)$  potencijal kanala,  $n_i$  sopstvena koncentracija nosilaca naelektrisanja,  $\gamma = t_{ox} / \epsilon_{ox} \cdot \sqrt{2\epsilon_o \epsilon_{ox} q N_{ch}}$  faktor podloge,  $q$  elementarno naelektrisanje,  $N_{ch}$  koncentracija primesa u kanalu,  $\epsilon_o$  i  $\epsilon_{ox}$  dielektrične konstante vakuuma i relativna dielektrična konstanta oksida, respektivno, i  $V_{fb}$  napon ravnih zona. Rešavanje gornjih implicitnih jednačina postignuto je u modelu korišćenjem pomoćnih diodnih kola kako je opisano u [6,7]. Dobijene vrednosti se potom preslikavaju na ulaz i izlaz voda u TL potkolu preko naponskih generatora  $\phi_{S1}$  i  $\phi_{Sn}$ . Ovim pristupom omogućeno je da se SPICE programom izračunaju struje i naponi na svim kontaktima MOSFET-a kako je već opisano u [6,7].

### 3. PRIMENA NS MOSFET MODELA ZA ANALIZU STABILNOSTI CMOS OPERACIONOG POJAČAVAČA

Kao primer primene NS MOSFET modela u simulatorima kola, analizirana je stabilnost operacionog pojačavača sa Sl. 3 [9]. Pretpostavljeno je da je pojačavač realizovan u 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS tehnologiji. Korišćenjem TCAD programa ISE DIOS [10] za 2D simulaciju CMOS tehnološkog niza, dobijene su realne strukture CMOS tranzistora sa različitim dužinama kanala  $L$ . U tabeli 1 date su dimenzije CMOS tranzistora koji su korišćeni za realizaciju operacionog pojačavača sa Sl. 3. Zatim je, pomoću programa ISE DESSIS [10], za 2D numeričku simulaciju električnih karakteristika komponenata, izvršena kombinovana fizičko/električna simulacija (*mixed-mode* simulacija) rada operacionog pojačavača.

Na Sl. 4 su prikazane tako dobijene amplitudska i fazna karakteristika naponskog pojačanja nekompenzovanog (bez RC grane) operacionog pojačavača. Takođe su prikazane iste krive dobijene novim NS MOSFET modelom i standardnim kvazistacionarnim (KS) i nestacionarnim (NS) BSIM3 modelima. Napomenimo da su parametri BSIM3

modela dobijeni korišćenjem paketa ISE Extract [10], dok su fizički parametri NS MOSFET modela podešeni prema



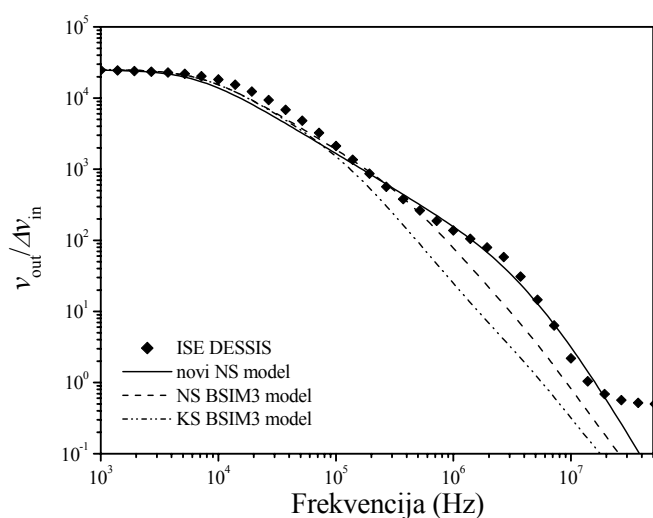
Sl.3. Električna šema operacionog pojačavača.

Tabela 1. Dimenzije CMOS tranzistora korišćenih u simulaciji operacionog pojačavača.

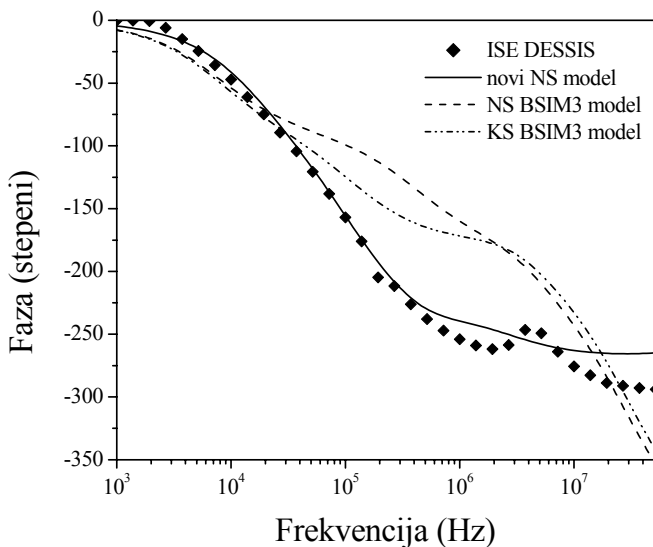
	$L$ ( $\mu\text{m}$ )	$W$ ( $\mu\text{m}$ )
M1, M2, M5, M8	5	15
M3, M4, M7	5	70
M6	5	30
M9	2	150
M91	2	15
M10	2	700
M101	2	70

odgovarajućim parametrima fizičkih modela ugrađenih u simulatoru ISE DESSIS [10]. Uočljivo je dobro slaganje rezultata novog NS MOSFET modela sa rezultatima *mixed-mode* analize, dok oba standardna BSIM3 modela pokazuju značajna odstupanja. Naročito je primetno na Sl.4 da primena standardnih KS MOSFET modela ne predviđa dobro ni amplitudsku ni faznu karakteristiku.

Sa stanovišta stabilnosti operacionog pojačavača, uobičajeno je da se definiše *marginu stabilnosti* bilo u odnosu na pojačanje ili u odnosu na fazu. Ovde će biti izvršena analiza stabilnosti pojačavača sa stanovišta faze. Margina faze  $M_\phi$  se definiše kao razlika  $180^\circ$  i faznog pomeraja pri frekvenciji pri kojoj je amplituda pojačanja jednaka 1. Za bezuslovnu stabilnost pojačavača margina faze mora biti pozitivna [11]. Na Sl. 4 se uočava da je za nekompenzovano pojačanje  $M_\phi = -102^\circ$ . Na Sl. 5 su prikazane amplitudska i fazna karakteristika naponskog pojačanja za tri različite vrednosti kapacitivnosti u grani za kompenzaciju ( $R=0$ ). Vidi se da, dok i NS MOSFET model i *mixed-mode* simulacija pokazuju da pojačavač nije stabilan ni za jednu od primenjenih kapacitivnosti, NS BSIM3 model predviđa stabilnost pojačavača već za kapacitivnost  $C = 8\text{ pF}$ .



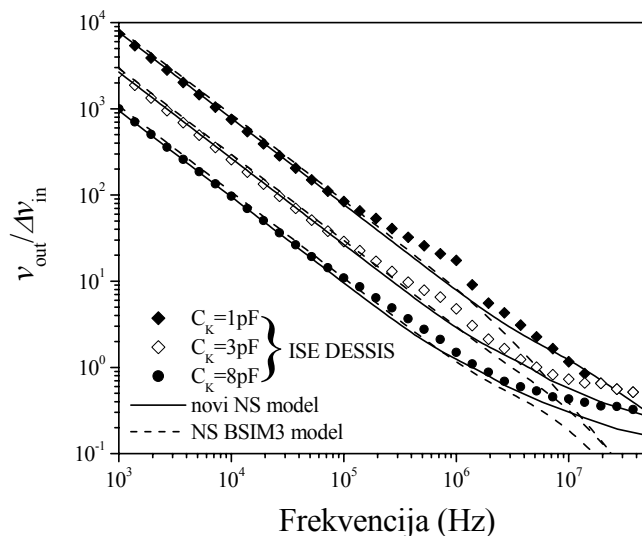
(a)



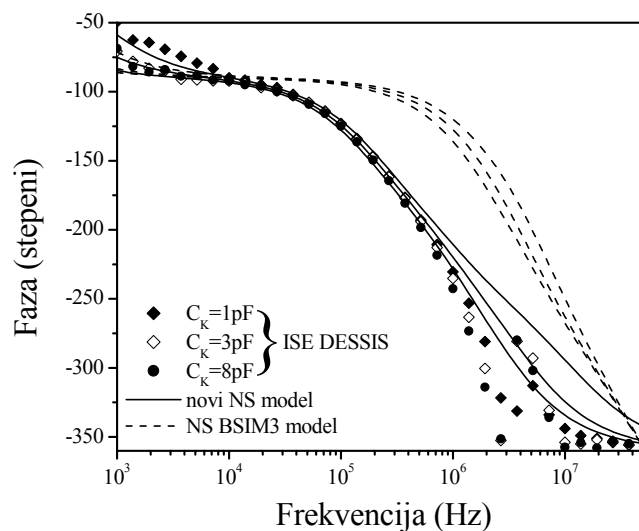
(b)

Sl.4. Amplitudska (a) i fazna (b) karakteristika naponskog pojačanja operacionog pojačavača bez grane za kompenzaciju.

Sl. 6 pokazuje da se granični slučaj stabilnosti ( $M_\phi = 0$ ) postiže tek sa dodavanjem otpornika  $R = 15\text{ k}\Omega$  i kondenzatora  $C = 8\text{ pF}$ . Napomenimo, takođe, da je simulacija pojačavača pokazala da otpornik neznatno menja vrednosti pojačanja i graničnu frekvenciju, ali da znatno utiče na smanjenje margine faze pojačavača što je u saglasnosti sa teorijom [8]. U tabeli 2 date su vrednosti margine faze  $M_\phi$  za sve analizirane mogućnosti kompenzacije, kao i za potpuno nekompenzovan pojačavač. Sa Sl. 6 i iz tabele 2 se jasno vidi da se novi NS MOSFET model odlično slaže sa rezultatima *mixed-mode* simulacije, dok za ovu RC kombinaciju KS i NS BSIM3 modeli pogrešno predviđaju da je pojačavač već stabilisan uz veliku pozitivnu vrednost margine faze. Ovo ukazuje da standardni BSIM3 modeli ne uključuju pravilno nestacionarne efekte MOSFET-ova.



(a)

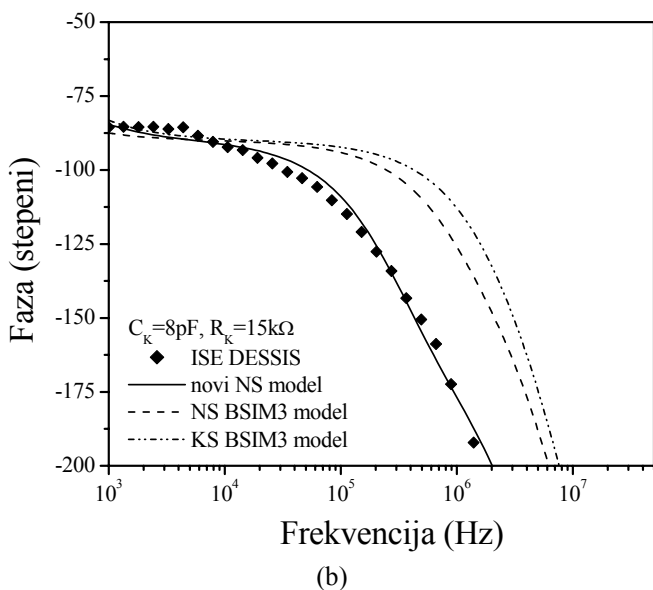
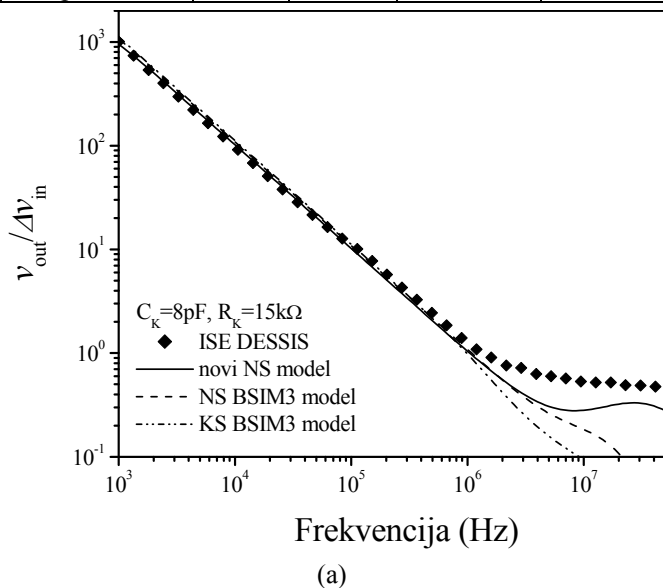


(b)

Sl.5. Amplitudska (a) i fazna (b) karakteristika naponskog pojačanja operacionog pojačavača sa kondenzatorom u grani za kompenzaciju.

Tabela 2. Vrednosti margine faze  $M_\phi$  dobijene primenom različitih modela.

	Mixed -mode	NS model	BSIM3 NS model	BSIM3 KS model
bez. komp.	-102°	-84°	-58°	-27°
C=1pF, R=0	-165°	-121°	-22°	-6°
C=3pF, R=0	-113°	-118°	-4°	3°
C=8pF, R=0	-93°	-71°	26°	10°
C=8pF, R=15k	0°	0°	54°	67°



Sl. 6. Amplitudska (a) i fazna (b) karakteristika naponskog pojačanja kompenzovanog operacionog pojačavača.

#### 4. ZAKLJUČAK

Opisan je novi fizički baziran nestacionarni električni model MOSFET-a koji pravilno uključuje kašnjenje nosilaca naelektrisanja u kanalu tranzistora. Novi električni model MOSFET-a je primenjen u simulatoru električnih kola SPICE. Analizirana je amplitudska i fazna karakteristika naponskog pojačanja operacionog pojačavača, kao i načini za postizanje stabilnosti pojačavača. Pokazano je da se novi NS

model odlično slaže sa rezultatima 2D *mixed-mode* numeričke simulacije, dok standardni kvazistacionarni i nestacionarni BSIM3 modeli daju značajnu grešku u predviđanju margine stabilnosti naponskog pojačanja.

#### LITERATURA

- [1] D. Foty, "Effective MOSFET modeling for SPICE circuit simulation", *Proc. of Northcon/98 Conference*, Seattle, 1998, pp. 228-235.
- [2] Y. Tsvividis, *Operation and modeling of the MOS transistors*, 2<sup>nd</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 1999.
- [3] W. Liu, *SPICE MOSFET Models for Spice Simulation, Including BSIM3v3 and BSIM4*, Wiley-Interscience, 2001.
- [4] M. Chan, K. Hui, C. Hu, P.K. Ko, "A robust and physical BSIM3 non-quasi-static transient and AC small-signal model for circuit simulation", *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 45, pp. 834-841, 1998.
- [5] J.W. Nilsson, J.R. Evans, *PSPICE Manual Using Orcad Release 9.2 for Introductory Circuits*, Prentice Hall, 2002.
- [6] T. Pešić, N. Janković, "A compact non-quasi-static MOSFET model based on the equivalent non-linear transmission line", prihvaćen za publikovanje u *IEEE Trans. on Computer-Aided-Design of Integrated Circuits and Systems*.
- [7] T. Pešić, N. Janković, "Physical-based non-quasi static MOSFET model for DC, AC and transient circuit analysis", *Proc. of 24<sup>th</sup> International Conference on Microelectronics – MIEL 2004*, vol. 1, pp. 261-264, 2004.
- [8] J.R. Brews, "A charge sheet model of the MOSFET", *Solid-State Electronics*, vol. 21, pp. 345-355, 1978.
- [9] R.J. Baker, H.W. Li, D.E. Boyce, *CMOS – Circuit Design, Layout and Simulation*, John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [10] *ISE – Users Manual*, Release 7.0, Integrated System Engineering AG, 1998.
- [11] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New York, 1970.

**Abstract** - In this paper, a novel compact non-stationary (NS) MOSFET model based on the equivalent non-linear transmission line circuit describing a finite carrier transit time in the channel is presented. A new NS MOSFET model is implemented in SPICE program for simulation of the magnitude and the phase frequency characteristics of CMOS operational amplifier. Based on the comparison with precise numerical physical/electrical (*mixed-mode*) simulation, it is shown that employing a new NS TL model in circuit simulations yields accurate values of cut-off frequencies and phase margins of the amplifier. In contrast, it is found that significant disagreement exists between the simulation results with standard NS BSIM3 models and the mixed-mode numerical simulations.

#### IMPORTANCE OF EMPLOYING ACCURATE NON-STATIONARY MOSFET MODEL FOR SIMULATION OF CMOS ANALOG CIRCUITS

Tatjana Pešić, Nebojša Janković