

**PROJEKTOVANJE AKTIVNOG NISKOPROPUSNOG FILTRA U 0,18  $\mu\text{m}$  CMOS  
TEHNOLOGIJI****DESIGN OF CMOS ACTIVE LOW-PASS FILTER IN 0,18  $\mu\text{m}$  CMOS TECHNOLOGY**Kristina Nikolić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTOTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – U ovom radu je projektovan aktivni Batervortov niskopropusni filter šestog reda u 0,18  $\mu\text{m}$  CMOS tehnologiji. Topologija se sastoji iz kaskadne veze tri filtra drugog reda. Filter drugog reda je projektovan korišćenjem Salen-Ki topologije koja se sastoji iz dvostepenog operacionog pojačavača, dva otpornika i dva kondenzatora. Projektovani filter ima maksimalno slabljenje u propusnom opsegu 9,5217 mdB i minimalno slabljenje u nepropusnom opsegu 50 dB. Granična učestanost je 52,3 kHz, a potrošnja kola 2,27 mW.

**Ključne reči:** CMOS tehnologija, integrisana kola, niskopropusni filter, operacioni pojačavač.

**Abstract** – The sixth-order active Butterworth low-pass filter has been designed in 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS technology in this paper. The topology consists of three second-order filters. The second-order filter is designed by using the Sallen-Key topology containing two stage operational amplifier, two resistors and two capacitors. The designed filter has a maximum passband attenuation of 9.5217 mdB and a minimum stopband attenuation of 50 dB. The cutoff frequency is 52.3 kHz and the power consumption is 2.27 mW.

**Keywords:** CMOS technology, integrated circuits, low-pass filter, operational amplifier.

**1. UVOD**

Aktivni filtri su električna kola koja se koriste za potiskivanje šuma ili neželjenih delova signala koji se dovodi na ulaz filtra [1]. Filtri takođe mogu da se koriste i za poravnanje signala na izlazu digitalno-analognih konvertora [1]. Spektralne karakteristike ulaznog signala se menjaju pri prolasku kroz filter u zavisnosti od uloge za koju je filter namenjen [2].

Osnovne aproksimacije prenosne karakteristike filtra su Batervortova aproksimacija, Čebiševljeva prvog reda, Čebiševljeva drugog reda, Eliptička i Beselova aproksimacija [3]. Najčešće korišćene topologije za realizaciju filtera (na frekvencijama reda MHz) u integrisanim tehnologijama su Gm-C topologija, biquad topologija, Salen-Ki topologija (engl. *Sallen Key topology*) i topologija sa višestrukim povratnim spregama (engl. *Multifeedback topology*).

**NAPOMENA:**

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Jelena Radić, docent

Cilj ovog rada jeste projektovanje filtra propusnika niskih učestanosti (NF) koji potiskuje komponente ulaznog signala na višim učestanostima, odnosno u nepropusnom opsegu. Korišćena je Batervortova aproksimacija prenosne funkcije za dobijanje maksimalno ravne karakteristike u propusnom opsegu. Za realizaciju filtra je odabrana Salen-Ki topologija, pre svega zbog njene jednostavnosti, ali i mogućnosti realizacije filtera višeg reda prostim kaskadnim vezivanjem.

**2. PROJEKTOVANJE DVOSTEPENOG  
OPERACIONOG POJAČAVAČA**

Na slici 1 je prikazana električna šema dvostepenog operacionog pojačavača koja je projektovana u programskom paketu *Cadence* korišćenjem 0,18  $\mu\text{m}$  UMC CMOS tehnologije. Prvi stepen predstavlja diferencijalni pojačavač koji obezbeđuje veliko pojačanje, a drugi stepen je stepen sa zajedničkim sorsom koji obezbeđuje veći opseg napona na izlazu i dodatno pojačanje. Proračun početnih dimenzija tranzistora i vrednosti komponenti kola je urađen na osnovu postupaka prikazanih u [4].

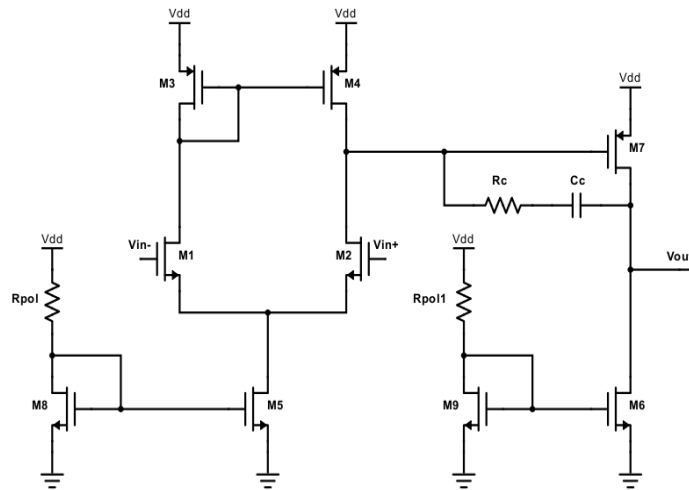
U toku simulacija se pokazalo da pojačavač ima bolje karakteristike ukoliko ova dva stepena imaju odvojene polarizacije zbog ograničenja korišćenih modela tranzistora koji za širinu tranzistora dozvoljavaju samo celobrojne umnoške vrednosti 5  $\mu\text{m}$ , pa se ne može postići optimalna polarizacija ako se koristi isto strujno ogledalo.

**2.1. Specifikacije parametara operacionog pojačavača**

Zahtevi, odnosno granične vrednosti osnovnih parametara koje operacioni pojačavač treba da ispuni su sledeće:

- $A_{vdB} \geq 60$  dB,
- $GBW > 50$  MHz,
- $CMIR \sim 0.6$  V – 1.6 V,
- $SR \geq 10$  V/ $\mu\text{s}$ ,
- $P_{diss} \leq 1$  mW,
- $PM \geq 70^\circ$ ,
- $V_{DD} = 1.8$  V.

Parametar GBW predstavlja učestanost jediničnog pojačanja koja je jednaka proizvodu pojačanja i propusnog opsega (engl. *gain bandwidth* - GBW). Parametar CMIR je dozvoljeni opseg napona na ulazu (engl. *common mode input range* - CMIR). SR predstavlja brzinu promene signala na izlazu (engl. *slew rate* - SR), a PM faznu marginu (engl. *phase margin* - PM).



Slika 1. Električna šema operacionog pojačavača [4]

## 2.2. Rezultati simulacija operacionog pojačavača

Tokom analize naizmeničnih signala na ulaz operacionog pojačavača se dovodi naizmenični signal sa jednosmernom komponentom koja je neophodna za polarizaciju tranzistora na ulazu, a na izlazu je priključeno kapacitivno opterećenje koje ima vrednost 1 pF.

U DC analizi pojačavač se testira u zatvorenoj povratnoj sprezi i iz nje se mogu dobiti dozvoljeni opseg napona na ulazu kola i potrošnja.

Brzina promene signala na izlazu se dobija iz tranzijentne analize koja se takođe radi u zatvorenoj povratnoj sprezi pojačavača i umesto naizmeničnog signala, na ulaz kola se dovodi povorka pravougaonih impulsa.

Sve ostale karakteristike se dobijaju iz naizmenične (AC) analize.

Brojnim simulacijama i parametrizovanim analizama se dolazi do optimalnih dimenzija tranzistora i vrednosti elemenata kola koje su prikazane u tabeli 1. Korišćeni modeli tranzistora su ograničeni i imaju fiksnu dužinu kanala 0,18  $\mu\text{m}$ , pa se svaki tranzistor u projektovanom kolu sastoji od redne veze dva tranzistora da bi dužina kanala bila 0,36  $\mu\text{m}$  kako bi se izbegli neželjeni efekti kratkog kanala. Maksimalna širina korišćenih modela tranzistora je 105  $\mu\text{m}$ , odnosno 21 prst (engl. *finger*) širine 5  $\mu\text{m}$ . Neki tranzistori u projektovanom pojačavaču imaju

Tabela 1. Optimalne vrednosti elemenata operacionog pojačavača

Komponenta	Vrednost	Komponenta	Vrednost
$W_{1,2}$ [ $\mu\text{m}$ ]	225,0	$W_8$ [ $\mu\text{m}$ ]	105,0
$W_3$ [ $\mu\text{m}$ ]	75,0	$W_9$ [ $\mu\text{m}$ ]	70,0
$W_4$ [ $\mu\text{m}$ ]	75,0	$R_{pol}$ [k $\Omega$ ]	11,0
$W_5$ [ $\mu\text{m}$ ]	130,0	$R_{pol1}$ [k $\Omega$ ]	28,40
$W_6$ [ $\mu\text{m}$ ]	135,0	$R_c$ [k $\Omega$ ]	1,0
$W_7$ [ $\mu\text{m}$ ]	90,0	$C_c$ [pF]	3,65

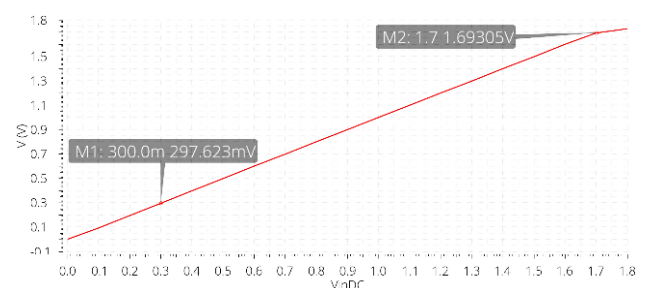
veću širinu, a to se postiže paralelnim vezivanjem tranzistora. Tako, na primer, tranzistori M1 i M2, koji

imaju širinu 225  $\mu\text{m}$  se sastoje od paralelne veze tri tranzistora sa širinama od 75  $\mu\text{m}$ .

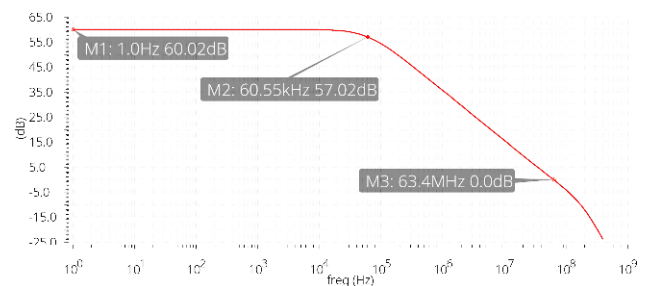
Na slici 2 je prikazana karakteristika zavisnosti izlaznog napona ( $V_{outDC}$ ) od napona na ulazu u analizi jednosmernih signala. U linearnom režimu rada operacionog pojačavača, napon na izlazu treba da prati promene napona na ulazu i opseg napona koji zadovoljava taj uslov se naziva dozvoljeni opseg napona na ulazu, odnosno parametar *CMIR*. Vrednost parametra u ovom radu obuhvata napone od 0,3 V do 1,7 V.

Slika 3 prikazuje karakteristiku pojačanja ( $A_v$ ) projektovanog dvostepenog operacionog pojačavača. Vrednost pojačanja pojačavača na nižim učestanostima iznosi 60,02 dB. Sa iste karakteristike se mogu očitati vrednosti učestanosti jediničnog pojačanja i 3 dB propusnog opsega pojačavača.

Propusni opseg projektovanog pojačavača se očitava na mestu gde je pojačanje opalo za 3 dB (57,02 dB) i iznosi 60,55 kHz.



Slika 2. Zavisnost izlaznog od ulaznog napona (DC)



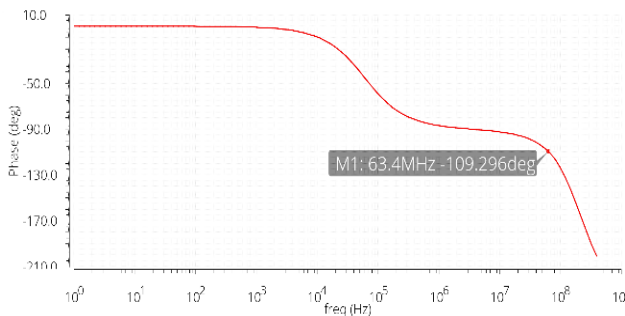
Slika 3. Pojačanje operacionog pojačavača

Jedinična učestanost (GBW) je učestanost na kojoj je pojačanje jednako jedinici, odnosno 0 dB u slučaju da je pojačanje izraženo u decibelima. Projektovani operacioni pojačavač ima vrednost parametra GBW od 63,4 MHz.

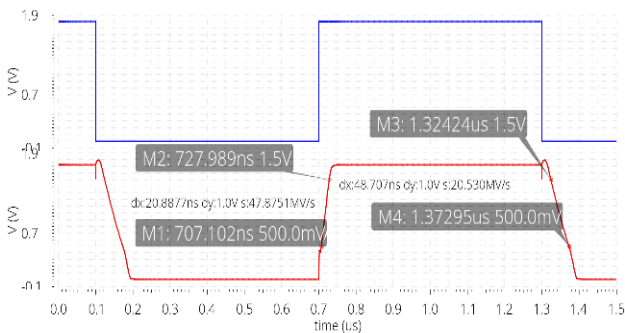
Na slici 4 je data fazna karakteristika projektovanog operacionog pojačavača. Fazna margina se dobija postavljanjem markera na dobijenoj jediničnoj učestanosti (63,4 MHz), očitavanjem faznog ugla i oduzimanjem očitane faznog ugla od 180°. Očitana vrednost faze je 109,295°, pa fazna margina iznosi 70,7°.

Na slici 5 su prikazani povorka pravougaonih impulsa koja je dovedena na ulaz operacionog pojačavača pomoću generatora implusnih signala i dobijeni signal na izlazu na osnovu kojih je određena vrednost parametra SR.

U slučaju projektovanog dvostepenog operacionog pojačavača brzina promene uzlazne ivice iznosi 47,88 V/μs, a brzina promene silazne ivice je 20,53 V/μs, što ispunjava definisane zahteve.



Slika 4. Fazna karakteristika operacionog pojačavača



Slika 5. Rezultati tranzijentne analize

### 3. PROJEKTOVANJE AKTIVNOG NISKOPROPUSNOG FILTRA

Prvi korak prilikom projektovanja filtra je određivanje reda filtra ( $n$ ) i granične učestanosti filtra ( $f_n$ ). Nakon toga se određuju koeficijenti prenosne funkcije filtra na osnovu zadatih karakteristika, dobijenog reda i granične učestanosti filtra. Ovi parametri se mogu dobiti korišćenjem programskog paketa *MATLAB*.

#### 3.1. Specifikacije niskopropusnog filtra

Zahtevi koje filter treba da ispuni su:

- $W < 100$  kHz,
- $R_p < 1$  dB,
- $R_s < 50$  dB,
- *Maksimalno ravna karakteristika u propusnom opsegu.*

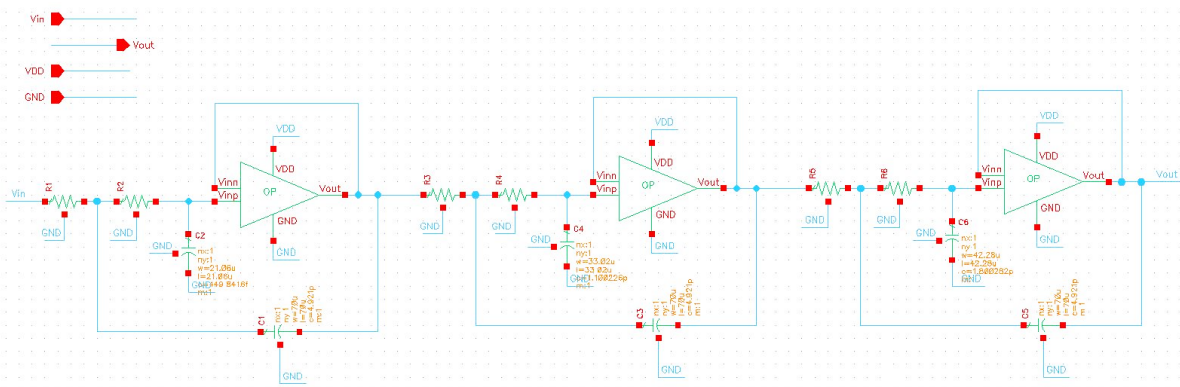
Širina prelazne oblasti  $W$  treba da bude manja od 100 kHz, slabljenje u propusnom opsegu ( $R_p$ ) manje od 1 dB, a slabljenje u nepropusnom opsegu ( $R_s$ ) manje od 50 dB. Maksimalno ravna karakteristika u propusnom opsegu se postiže korišćenjem Batervortove aproksimacije.

Red filtra se pronalazi funkcijom *buttord* i ima vrednost 6, a granična učestanost ( $f_n$ ) ima vrednost 53,64 kHz, što je približno jednako 3 dB učestanosti projektovanog operacionog pojačavača (60,55 kHz).

S obzirom da je dobijen red filtra 6, on se sastoji od tri kaskadno vezana filtra drugog reda realizovana pomoću Salen-Ki topologije. Šema ovako realizovanog filtra je prikazana na slici 6 i projektovana je korišćenjem programskog paketa *Cadence*.

Da bi se dobili koeficijenti prenosne funkcije Batervortovog filtra koristi se funkcija *butter* iz programskog paketa *MATLAB*. Dobijena prenosna karakteristika ima polinom šestog reda u imeniocu, pa mora da se rastavi na tri prenosne funkcije sa polinomom drugog reda u imeniocu. Kada se polinom razloži, početne vrednosti otpornosti se biraju intuitivno, na osnovu iskustva, a početne vrednosti kondenzatora se računaju izjednačavanjem tri dobijene funkcije sa prenosnom funkcijom Salen-Ki topologije, koja ima oblik [3]:

$$A(s) = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2 s^2 + C_1 (R_1 + R_2) s + 1} \quad (3.1)$$



Slika 6. Električna šema niskopropusnog filtra

gde indeksi otpornika i kondenzatora odgovaraju oznakama u prvom filtru u kaskadnom lancu prikazanom na slici 6.

### 3.2. Rezultati simulacija niskopropusnog filtra

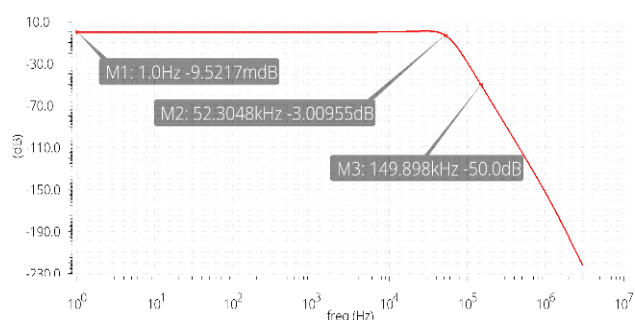
Na ulaz test kola projektovanog filtra se dovodi naizmenični signal, a na izlazu je priključeno kapacitivno opterećenje koje ima vrednost 1 pF, slično kao kod operacionog pojačavača.

Da bi se dobile optimalne vrednosti elemenata kola, koje su prikazane u tabeli 2 vrše se brojne simulacije i parametrizovane analize.

Na slici 7 je prikazana prenosna karakteristika projektovanog filtra. Markerom M1 je označeno slabljenje u propusnom opsegu i iznosi 9,4878 mdB. Marker M2 prikazuje frekvenciju na kojoj je signal oslabio za 3 dB, odnosno kraj propusnog opsega ili graničnu frekvenciju filtra koja iznosi 52,3 kHz (približno jednaka vrednosti 3 dB frekvencije operacionih pojačavača od kojih se filter sastoji).

Kraj prelazne oblasti i početak nepropusnog opsega predstavlja učestanost na kojoj slabljenje ima vrednost 50 dB (na osnovu postavljenih zahteva) i označena je markerom M3. Ova frekvencija ima vrednost 149,89 kHz, pa je širina prelazne oblasti 97,58 kHz.

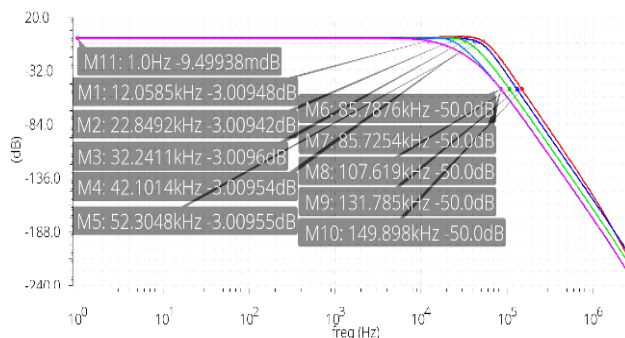
Simulacijama je utvrđeno da projektovani filter promenom vrednosti odgovarajućih otpornosti i kapacitivnosti može imati različit propusni opseg, a da pri tome zadovoljava sve druge postavljene zahteve. Dakle, može se napraviti filter sa promenljivom širinom propusnog opsega korišćenjem mreže otpornika i kondenzatora čija vrednost se može digitalno upravljati, što nije zadatak rada, ali predstavlja podlogu za dalja istraživanja.



Slika 7. Prenosna karakteristika projektovanog filtra

Tabela 2. Optimalne vrednosti elemenata filtra

Komponenta	Vrednost	Komponenta	Vrednost
$R_1$ [M $\Omega$ ]	1,2	$C_1$ [pF]	5,0
$R_2$ [M $\Omega$ ]	1,2	$C_2$ [pF]	0,45
$R_3$ [M $\Omega$ ]	1,0	$C_3$ [pF]	5,0
$R_4$ [M $\Omega$ ]	1,0	$C_4$ [pF]	1,1
$R_5$ [k $\Omega$ ]	800,0	$C_5$ [pF]	5,0
$R_6$ [k $\Omega$ ]	800,0	$C_6$ [pF]	1,8



Slika 8. Prenosne karakteristike filtra

Na slici 8 su prikazane prenosne karakteristike filtra za širine propusnog opsega od 12 kHz do 52 kHz sa korakom 10 kHz, dobijene za različite vrednosti elemenata kola.

Sa slike 8 se vidi da je pojačanje u propusnom opsegu uvek manje od 10 mdB i da su prenosne karakteristike maksimalno ravne. Širine svih prelaznih oblasti su manje od 100 kHz.

### 4. ZAKLJUČAK

U ovom radu je opisan postupak projektovanja dvostepenog operacionog pojačavača, a zatim pomoću njega realizacija Batervortovog aktivnog niskopropusnog filtra korišćenjem Salen-Ki topologije. Projektovani pojačavač i filter moraju da zadovolje određene zahteve, na osnovu koji se na početku vrši proračun vrednosti elemenata kola, a zatim se radi optimizacija istih dok se ne dođe do željenih karakteristika. Projektovanje predstavlja dugotrajan proces sa ponekad neželjenim efektima koji sam proces simuliranja mogu vratiti i po nekoliko koraka unazad.

Namena rada je bila detaljna analiza postupka projektovanja topologije niskopropusnog filtra u UMC 180 nm CMOS tehnologiji, sa ciljem dobijanja što boljih karakteristika. Dat je predlog za unapređenje filtra pružanjem mogućnosti podešavanja njegovih karakteristika projektovanjem topologije sa promenljivim propusnim opsegom korišćenjem digitalno upravljivih otporničkih i kondenzatorskih mreža, pri čemu se zadržava vrednost pojačanja u propusnom opsegu i širina prelazne oblasti.

### 5. LITERATURA

- [1] B. Razavi, *RF Microelectronics*, Second Edition, Castleton, New York, USA, 2011.
- [2] H. Uhrmann, R. Kolm, H. Zimmermann, *Analog Filters in Nanometer CMOS*, Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 2014.
- [3] P.V. Ananda Mohan, *VLSI Analog Filters*, New York, USA, 2013.
- [4] P. E. Allen, D. R. Holberg, *CMOS Analog Circuit Design*, Oxford University Press

### Kratka biografija:



**Kristina Nikolić** rođena je u Pirotu 1995. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Energetika, elektronika i telekomunikacije uradila je 2019.god. kontakt: kristinanikolic@uns.ac.rs