

ПРОЈЕКТОВАЊЕ УНИВЕРЗАЛНОГ БИКВАДРАТНОГ Gm-C ФИЛТРА

DESIGN OF UNIVERSAL MULTIMODE Gm-C BIQUAD FILTER

Горан Попадић, Факултет техничких наука, Нови Сад

Област – ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И РАЧУНАРСТВО

Кратак садржај – У овом раду је пројектован универзални биквадратни MISO (енгл. Multiple Input Single Output) филтар у 0,13 μm CMOS UMC технологији. Филтар, који има три улаза и један излаз, може да ради у више режима: напонском, транскондуктанском, струјном и трансрезистивном. Пројектовани филтар има граничну (централну) фреквенцију око 251 MHz и потрошњу око 4,5 mA.

Кључне речи: универзални Gm-C филтар, операциони транскондуктансни појачавач, коло за поларизацију, фактор добротe, транскондуктанса, корнер анализе.

Abstract – In this paper an universal biquadratic MISO (Multiple Input Single Output) filter is designed in 0,13 μm CMOS UMC technology. The filter, having three inputs and one output, can operate in multiple modes: voltage, transconductance, current, and transresistance. The designed filter has a cut-off (center) frequency of about 251 MHz and a current consumption of about 4.5 mA.

Keywords: universal Gm-C filter, Operational Transconductance Amplifier (OTA), biasing circuit, quality factor, transconductance, corner analyses.

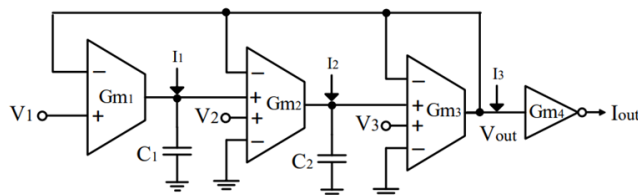
1. УВОД

Електрични филтри су кола која обликују фреквенцијски спектар улазног електричног сигнала на основу прописаних захтева. У овом раду је пројектован филтар заснован на операционим транскондуктанским појачавачима (енгл. Operational Transconductance Amplifier – OTA). Предност употребе ових појачавача је лако подешавање параметара филтара, што их чини веома погодним за примену у интегрисаним колима. ОТА-С или Gm-C филтри користе само појачаваче и кондензаторе па се једноставно реализују.

Њихове предности, попут мале површине, потрошње и цене, им обезбеђују широку примену. На пример, могу се пронаћи у аудио опреми, у мрежи са три канала за распоређивање фреквенцијских домена у три опсега (ниски, средњи и високи) која садржи три филтра (нископропусник, високопропусник и пропусник опсега фреквенција) [1].

НАПОМЕНА:

Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је била др Јелена Радић, ванр. проф.



Слика 1. Предложена топологија универзалног биквадратног Gm-C филтра

2. АНАЛИЗА УНИВЕРЗАЛНОГ Gm-C ФИЛТРА

На слици 1 приказана је топологија предложеног филтра који се састоји од четири степена. Први степен представља ОТА коло са два улаза. Други и трећи степен представљају ОТА кола са четири улаза [2]. У транскондуктанском и струјном режиму рада се користи инвертујући појачавач (инвертор) на излазу. Дати филтар има могућност реализације свих филтарских функција: пропусник ниских фреквенција НФ (енгл. Low Pass – LP), пропусник опсега фреквенција ПО (енгл. High Pass – HP), пропусник високих фреквенција ВФ (енгл. Band Pass – BP), непропусник опсега фреквенција НО (енгл. Band Stop – BS) и пропусник свих опсега фреквенција ПФ (енгл. All Pass – AP).

Преносна функција филтра у **напонском режиму** [2]:

$$V_{out} = \frac{Gm_1 Gm_2 (V_1) + SC_1 Gm_2 (V_2) + S^2 C_1 C_2 (V_3)}{D(s)} \quad (1)$$

Преносна функција филтра у **струјном режиму** [2]:

$$I_{out} = - \frac{Gm_2 Gm_3 Gm_4 (I_1) + SC_1 Gm_3 Gm_4 (I_2) + S^2 C_1 C_2 (I_3)}{D(s)} \quad (2)$$

Преносна функција филтра у **трансрезистивном режиму** [2]:

$$V_{out} = \left(\frac{1}{Gm_3} \right) \frac{Gm_2 Gm_3 (I_1) + SC_1 Gm_3 (I_2) + S^2 C_1 C_2 (I_3)}{D(s)} \quad (3)$$

Преносна функција филтра у **транскондуктанском режиму** [2]:

$$I_{out} = - \frac{Gm_1 Gm_2 Gm_4 (V_1) + SC_1 Gm_2 Gm_4 (V_2) + S^2 C_1 C_2 Gm_4 (V_3)}{D(s)} \quad (4)$$

Полином у имениоцу је престављен једначином:

$$D(s) = S^2 C_1 C_2 + SC_1 Gm_2 + Gm_1 Gm_2 \quad (5)$$

Фактор добротe је дат једначином [2]:

$$Q = \sqrt{\frac{C_2 Gm_1}{C_1 Gm_2}} \quad (6)$$

Централна фреквенција је дата једначином [2]:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{Gm_1 Gm_2}{C_1 C_2}} \quad (7)$$

У напонском и транскондуктанском режиму рада струје I_1 , I_2 и I_3 су једнаке нули. Напони V_1 , V_2 и V_3 су једнаки нули у струјном и трансрезистивном режиму. Реализација одзива филтра је приказана у табели 1.

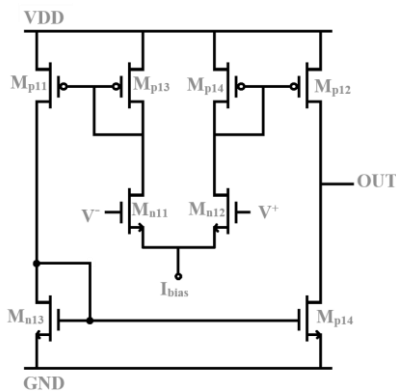
Табела 1. Добијање различитих одзива филтра

| Тип филтра (неинвертујући) | Напонски режим | | | Трансрезистивни режим | | |
|-------------------------------|----------------|----------|----------|-------------------------|----------|----------|
| | V_1 | V_2 | V_3 | I_1 | I_2 | I_3 |
| НФ | V_{in} | 0 | 0 | I_{in} | 0 | 0 |
| ПО | 0 | V_{in} | 0 | 0 | I_{in} | 0 |
| ВФ | 0 | 0 | V_{in} | 0 | 0 | I_{in} |
| НО | V_{in} | 0 | V_{in} | I_{in} | 0 | I_{in} |
| ПФ | V_{in} | V_{in} | V_{in} | I_{in} | I_{in} | I_{in} |
| Тип филтра (инвертујући) | Струјни режим | | | Транскондуктански режим | | |
| | I_1 | I_2 | I_3 | V_1 | V_2 | V_3 |
| НФ | I_{in} | 0 | 0 | V_{in} | 0 | 0 |
| ПО | 0 | I_{in} | 0 | 0 | V_{in} | 0 |
| ВФ | 0 | 0 | I_{in} | 0 | 0 | V_{in} |
| НО | I_{in} | 0 | I_{in} | V_{in} | 0 | V_{in} |
| ПФ | I_{in} | I_{in} | I_{in} | V_{in} | V_{in} | V_{in} |

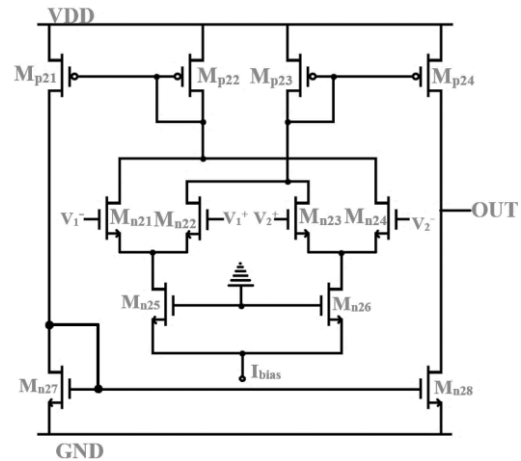
3. ПРОЈЕКТОВАЊЕ УНИВЕРЗАЛНОГ БИКВАДРАТНОГ G_m -C ФИЛТРА

Предложени филтар је пројектован у $0,13 \mu\text{m}$ UMC CMOS технологији. Коришћени су RF модели транзистора који раде на напону од $1,2 \text{ V}$ и имају минималну дужину канала 120 nm . На слици 2 дат је шематски приказ пројектованог двоулазног ОТА кола које представља први степен пројектованог филтра [3].

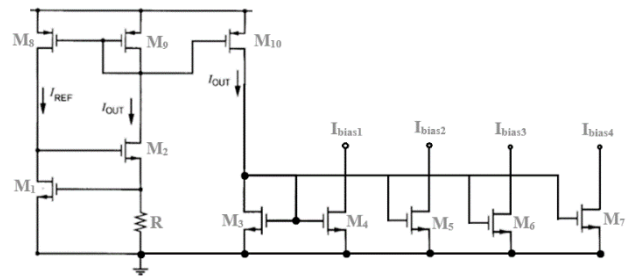
На слици 3 приказано је четвороулазно ОТА коло које чини други и трећи степен пројектованог филтра [2]. Такође је потребно имати добро пројектован струјни извор, како би се смањила промена струје (и тиме обезбедиле мање варијације транскондуктансе и централе фреквенције филтра) при процесним, напонским и температурним променама. Дужина канала транзистора струјног извора је већа од минималне и износи 200 nm , како би се повећала прецизност (смањила систематска грешка). На слици 4 је приказана електрична шема струјног извора [4]. Вредност отпорника је $5,6 \text{ k}\Omega$. Са терминала I_{bias1} се доводи струја за први, са I_{bias2} за други и са I_{bias3} за трећи степен филтра. Улога терминала I_{bias4} је поменута касније у раду. У табели 2 су приказане димензије транзистора пројектованих транскондуктанских појачавача.



Слика 2. ОТА коло са два улаза



Слика 3. ОТА коло са четири улаза



Слика 4. Струјни извор [4]

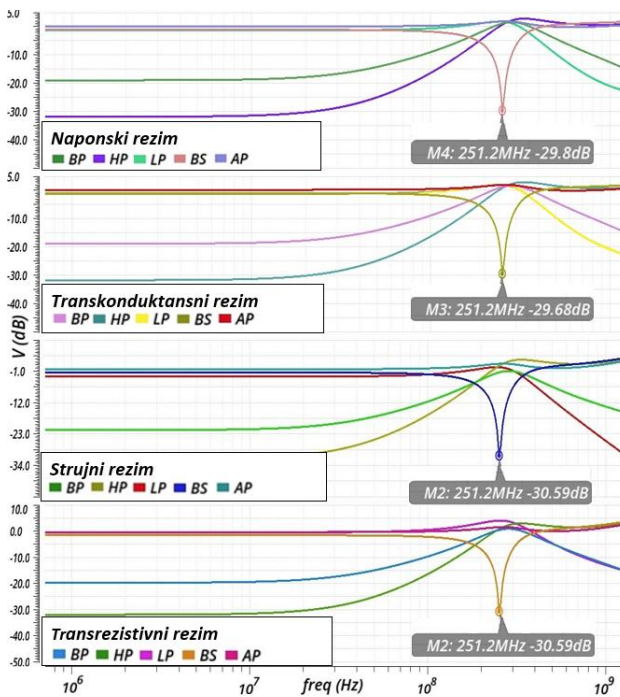
Табела 2. Димензије транзистора ОТА кола

| Транзистор | Број прстију | Број транзистора | Ширина канала [μm] |
|--------------------------------------|--------------|------------------|---------------------------------|
| M_{p11}, M_{p12} | 4,0 | 6,0 | 2,0 |
| M_{p13}, M_{p14} | 4,0 | 2,0 | 2,0 |
| M_{n11}, M_{n12} | 4,0 | 4,0 | 0,9 |
| M_{n13}, M_{n14} | 4,0 | 1,0 | 3,5 |
| M_{p21}, M_{p24} | 4,0 | 8,0 | 2,0 |
| M_{p22}, M_{p23} | 4,0 | 2,0 | 2,0 |
| $M_{n21}, M_{n22}, M_{n21}, M_{n24}$ | 4,0 | 4,0 | 3,5 |
| M_{n25}, M_{n26} | 4,0 | 8,0 | 2,0 |
| M_{n27}, M_{n28} | 4,0 | 1,0 | 1,1 |
| pmosinverter | 4,0 | 1,0 | 2,4 |
| nmosinverter | 4,0 | 1,0 | 2,0 |
| M_1, M_2 | 4,0 | 4,0 | 2,0 |
| M_3 | 4,0 | 2,0 | 2,0 |
| M_4 | 4,0 | 6,0 | 2,0 |
| M_5, M_6, M_7 | 4,0 | 12,0 | 2,0 |
| M_8, M_9, M_{10} | 4,0 | 1,0 | 2,0 |

4. РЕЗУЛТАТИ СИМУЛАЦИЈА И ДИСКУСИЈА

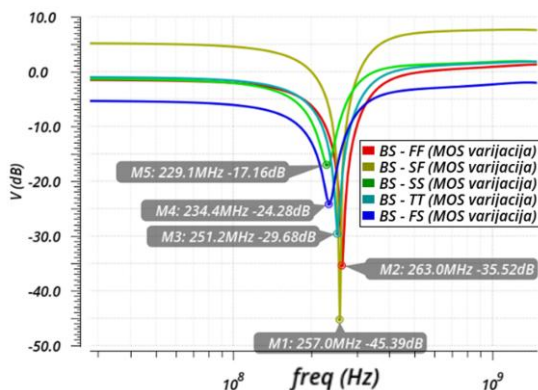
Централна фреквенција пројектованог филтра је око 251 MHz , док је фактор доброте приближно једнак јединици. Вредности транскондуктанси износе $G_{m1} = G_{m2} \approx 4 \text{ mS}$, а вредности капацитивности су $C_1 = C_2 = 2,6 \text{ pF}$. Напајање је симетрично и износи $\pm 0,6 \text{ V}$. Укупна потрошња кола је $4,5 \text{ mA}$. Струја I_{bias1} је $150 \mu\text{A}$, док су струје I_{bias2} и I_{bias3} једнаке $300 \mu\text{A}$. На слици 5 су приказани резултати анализа за различите режиме рада филтра.

Утицај промена процеса је анализиран коришћењем доступних модела са максималним одступањем технолошких параметара процеса (корнер модела). За транзисторе је посматрано следећих пет случајева:



Слика 5. Резултати симулација за све режими рада

TT – типични (номинални) корнер (енгл. *Typical NMOS – Typical PMOS*), SS – спор NMOS - спор PMOS (енгл. *Slow NMOS – Slow PMOS*), FS – брз NMOS -спор PMOS (енгл. *Fast NMOS – Slow PMOS*), SF – спор NMOS - брз PMOS (енгл. *Slow NMOS – Fast PMOS*), FF – брз NMOS - брз PMOS (енгл. *Fast NMOS – Fast PMOS*). Приликом корнер анализа се може уочити промена појачања за SF и FS корнере у транскондуктансном и струјном режиму рада. Ово понашање је очекивано и јавља се као последица промене заједничког (DC) напона на излазу инвертора, због тога што је увек један транзистор доминантнији и вуче напон на своју страну, слика 6.

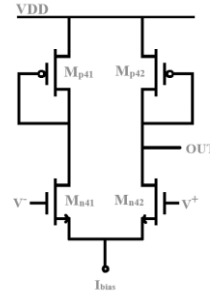


Слика 6. Транскондуктансни режим – инвертор

5. УНАПРЕЂЕЊЕ ТОПОЛОГИЈЕ Gm-C ФИЛТРА

Како би се избегле значајне промене карактеристика филтра услед промене заједничког напона на излазу инвертора за транскондуктансни појачавач на излазу филтра је употребљен диференцијални појачавач са диодним транзисторима као оптерећењем (уместо

инвертора). Електрична шема кола је приказана на слици 7. У табели 3 приказане су димензије транзистора пројектованог диференцијалног појачавача. На терминал I_{bias} се доводи струја са прикључка I_{bias4} са слике 4. Ова струја има велику вредност од 300 μA како би се постигао заједнички напон од 0 V на излазу. На позитиван улаз се доводи излаз из трећег степена (заједнички напон од 0 V), док се негативан улаз повезује на масу. Са терминала OUT се читавају карактеристике за транскондуктансни и струјни режим рада.

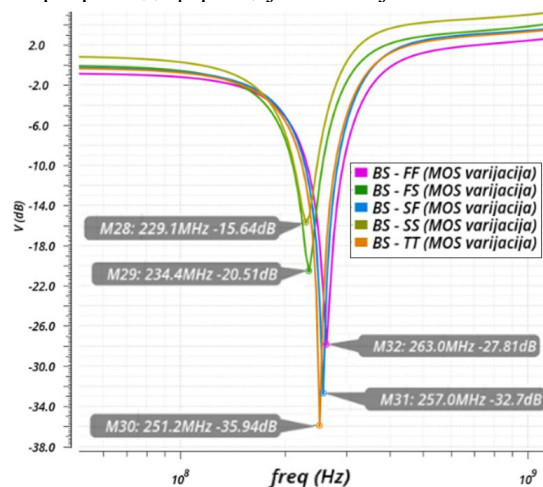


Слика 7. Диференцијални појачавач са диодно везаним транзисторима у оптерећењу

Табела 3. Димензије транзистора диференцијалног појачавача

| Транзистор | Број прстију | Број транзистора | Ширина канала [μm] |
|--------------------|--------------|------------------|---------------------------|
| M_{p41}, M_{p42} | 4 | 1 | 2 |
| M_{n41}, M_{n42} | 4 | 2 | 2 |

Резултати симулација за све режими рада су доста слични већ приказаним резултатима, уз знатно мања одступања карактеристика у корнер анализама (нпр. појачање у пропусном опсегу). Вредност централне фреквенције је око 251 MHz, док се слабљење у непропусном опсегу разликује за транскондуктансни режим и износи -35 dB, док за струјни износи -28 dB. На слици 8 приказани су резултати корнер анализа за транскондуктансни режим рада филтра након замене инвертора са диференцијалним појачавачем.



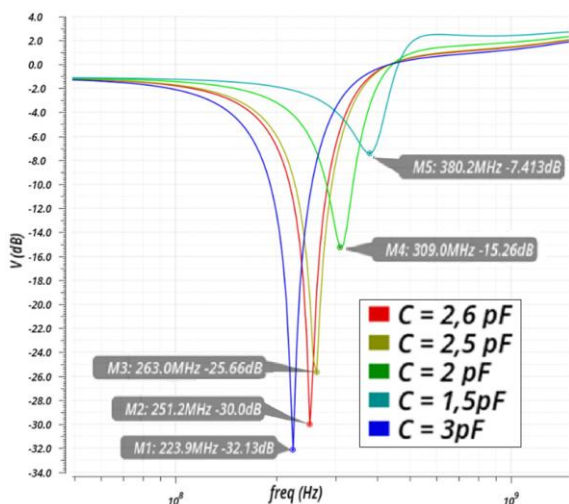
Слика 8. Транскондуктансни режим – диференцијални пар

У табели 4 дати су резултати корнер анализа при процесним, напонским и температурним променама: вредности централне фреквенције (f_0) и слабљења (α_N ,

α_{TK} , α_S , α_{TR} редом за напонски, транскондуктансни, струјни и трансрезистивни режим рада) на централној фреквенцији у непропусном опсегу.

Табела 4. Резултати корнер анализа

| Процесна варијација транзистора | | | | | | |
|---------------------------------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | TT | SS | FS | SF | FF | |
| f_0 [MHz] | 251,2 | 229,1 | 234,4 | 257 | 263 | |
| α_N [dB] | -30 | -16,9 | -20,2 | -51,8 | -35,4 | |
| α_{TK} [dB] | -35,9 | -15,6 | -20,5 | -32,7 | -27,8 | |
| α_S [dB] | -28,4 | -13,3 | -17,4 | -37,5 | -27,27 | |
| α_{TR} [dB] | -30,9 | -15,7 | -19,18 | -39,3 | -27,3 | |
| Варијација температуре | | | | | | |
| [°C] | 125 | 85 | 50 | 27 | 0 | -40 |
| f_0 [MHz] | 204,2 | 229,1 | 245 | 251,2 | 263 | 275 |
| α_N [dB] | -24,8 | -24,9 | -25,7 | -30 | -33,3 | -30,8 |
| α_{TK} [dB] | -27,6 | -27,4 | -27,6 | -35,9 | -30,7 | -26,3 |
| α_S [dB] | -22,5 | 25,3 | -27,9 | -28,4 | -38,2 | -30,5 |
| α_{TR} [dB] | -23 | -26,2 | -19,2 | -30,9 | -38,1 | -31,5 |
| Варијација отпорника | | | | | | |
| | MIN | TYP | MAX | | | |
| f_0 [MHz] | 281,8 | 251,2 | 229,1 | | | |
| α_N [dB] | -29,2 | -30 | -30,8 | | | |
| α_{TK} [dB] | -35,9 | -35,9 | -36,5 | | | |
| α_S [dB] | -26,7 | -28,4 | -29,9 | | | |
| α_{TR} [dB] | -29,3 | -30,9 | -32,4 | | | |
| Варијација кондензатора | | | | | | |
| | MIN | TYP | MAX | | | |
| f_0 [MHz] | 288,4 | 251,2 | 223,9 | | | |
| α_N [dB] | -19,6 | -30 | -33,2 | | | |
| α_{TK} [dB] | -19,9 | -35,9 | -27,4 | | | |
| α_S [dB] | -19,1 | -28,4 | -28,9 | | | |
| α_{TR} [dB] | -20,8 | -30,9 | -30,5 | | | |
| Варијација напона напајања | | | | | | |
| [mV] | 540 | 600 | 660 | | | |
| f_0 [MHz] | 239,9 | 251,2 | 263 | | | |
| α_N [dB] | -38,7 | -30 | -26,04 | | | |
| α_{TK} [dB] | -38,5 | -35,9 | -28,5 | | | |
| α_S [dB] | -32 | -28,4 | -27,8 | | | |
| α_{TR} [dB] | -32 | -30,9 | -29,7 | | | |



Слика 9. Зависност централне фреквенције од вредности кондензатора

Табела 5. Зависност централне фреквенције од вредности кондензатора

| C1=C2 [pF] | 1,5 | 2 | 2,5 | 2,6 | 3 |
|------------|-------|--------|-------|-------|-------|
| f_0 | 380,2 | 309 | 263 | 251,2 | 223,9 |
| α | -7,41 | -15,26 | -25,7 | -30 | -32,1 |

Потребно је још анализирати зависност централне фреквенције филтра од вредности капацитивности C_1 и C_2 . На основу резултата приказаних на слици 9 и у табели 5, ово коло може да ради максимално до 300 MHz јер се смањује слабљење у пропусном опсегу са порастом фреквенције.

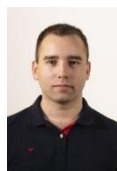
5. ЗАКЉУЧАК

У овом раду описан је поступак пројектовања универзалног биквадратног Gm-C филтра који може да ради у четири различита режима рада. Анализирана је топологија са инвертујућим појачавачем и диференцијалним појачавачем на излазу кола. Мана предложеног решења са диференцијалним појачавачем на излазу јесте већи број компоненти (већа заузета површина), док је предност мања осетљивост на процесне и напонске варијације. Одступања минимална вредност централне фреквенције од типичне вредности су: 8,76% (процесне варијације транзистора), 18,72% (температурне варијације), 8,76% (процесне варијације кондензатора) и 11,16% (процесне варијације кондензатора). Одступања максималне вредност централне фреквенције од типичне вредности су: 4,78% (процесне варијације транзистора), 9,56% (температурне варијације), 11,95% (процесне варијације отпорника) и 14,74% (процесне варијације кондензатора). Варијације напона изазивају 4,78 % одступања у оба случаја.

5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Hua-Pin Chen, Yi-Zhen Liao, Wen-Ta Lee, "Tunable mixed-mode OTA-C universal filter", *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, Vol. 58, pp. 135-141, Nov 2008.
- [2] Mostafa Parvizi, "Design of a new low power MISO multi-mode universal biquad OTA-C filter", *International Journal of Electronics*, Vol. 106, No. 3 pp. 440-454, Nov 2018.
- [3] Jean-Paul Eggenont, Denis De Ceuster, Denis Flandre, Bernard Gentinne, Paul G. A. Jespers, and Jean-Pierre Colinge, "Design of SOI CMOS Operational Amplifiers for Applications up to 300°C", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. 31, No. 2, pp. 179-186, February 1996.
- [4] Vlad Anghel, Gheorghe Brezeanu, "Low Current References With Supply Insensitive Biasing", *Annals of the Academy of Romanian Scientists Series on Science and Technology of Information*, Vol. 3, No. 2/2010, pp. 7-22, 2010.

Кратка биографија:



Горан Попадић рођен је у Новом Саду 1997. године. Мастер рад на Факултету техничких наука одбранио је 2024. године.

контакт: popadicgoran97@gmail.com