

UDK 621.372.54:621.391.82

OPTIMIZIRANI OTA-C NP FILTRI DRUGOG I ČETVRTOG REDA OPTIMIZED SECOND AND FOURTH-ORDER OTA-C LP FILTERS

Nino STOJKOVIĆ – Filip TOMLJENović – Saša VLAHINIĆ

Sažetak: Analizirana je niskopropusna opća OTA-C filtarska sekcija drugoga reda. Izračunata je spektralna gustoća napona šuma i Schoefflerova osjetljivost. Projektiranje filtra izvedeno je na dva načina, jednom baziranom na jednostavnosti proračuna filtarskih elemenata i drugom baziranom na optimizacijskom postupku. Optimizacija je provedena u cilju smanjivanja promatranih parametara: šuma i osjetljivosti. Rezultati analize dali su filtre sa smanjenim šumom i osjetljivosti. Optimizacijski postupak proveden je i za niskopropusni filter četvrtoga reda. Pokazano je da smanjenje jednoga parametra povećava drugi te je pri odabiru filtarskih elemenata potrebno napraviti kompromis.

Ključne riječi: – OTA-C filter
– šum
– osjetljivost
– optimizacija

Abstract: A general second-order low-pass OTA-C filter section is analyzed. Voltage noise spectral density and Schoeffler sensitivity are calculated. The design of the filter is performed in two ways, one based on simplicity of calculating filter elements and the other based on optimization. Optimization is done to decrease observed parameters: noise and sensitivity. The analyses results give a filter that gives lower sensitivity and noise. The optimization procedure is done for the fourth-order low-pass filter, as well. It is shown that decreasing one of the two parameters increases the other and a compromise has to be made in designing filter elements.

Keywords: – OTA-C filter
– noise
– sensitivity
– optimization

1. UVOD

Od doba kad su se pojavili vremenski kontinuirani OTA C filtri našli su svoju primjenu u analognoj obradi signala [1-3]. Vrijednosti filtarskih elemenata mogu se izračunati na razne načine budući da u postupku proračuna ima više varijabli nego jednačbi. Ako se upotrijebi najjednostavnija metoda, neki dodatni parametri filtra, kao što su šum i osjetljivost, neće biti optimalni. Rad OTA-C filtra bit će bolji što je manji šum kao i osjetljivost. U prvom koraku optimizacija je provedena po šumu u cilju izračuna spektralne gustoće napona šuma i efektivne vrijednosti napona šuma kao mjere za šum. Nakon toga optimizacija je provedena na osjetljivosti korištenjem Schoefflerove mjere osjetljivosti. Kombinirajući dobivene rezultate obje su optimizacije provedene na općoj niskopropusnoj OTA-C filtarskoj sekciji drugoga reda. Konačno, potpuna optimizacija bit će provedena za filter 4. reda izveden kao kaskada dviju sekcija 2 reda.

1. INTRODUCTION

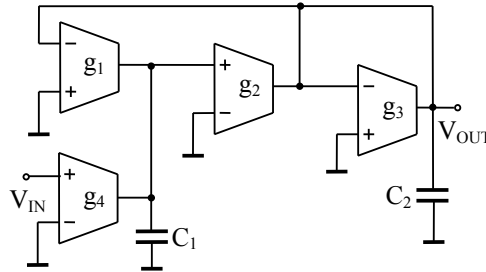
From the time they are designed, the continuous-time OTA-C filters find their application in analog signal processing [1-3]. The values of filter elements calculation can be done in various ways because in the designing procedure there are more variables than equations. If the simplest way is used, some additional parameters of the filter, such as noise figure and sensitivity figure, may not be optimal. The operation of the OTA-C filter will be better if output noise and/or sensitivity are lower. In the first step, optimization will be done on noise in such a way as to calculate voltage noise spectral density and RMS noise voltage as noise measurement. Then, optimization will be done on sensitivity using Schoeffler sensitivity measurement. Combining the obtained results, both optimizations will be performed on the second-order general low-pass OTA-C filter section. Finally, the complete optimization will be done for the fourth-order filter realized as a cascade of two second-order sections.

2. OPĆA OTA-C FILTARSKA SEKCIJA DRUGOG REDA

Opća OTA-C filtarska sekcija drugog reda u nisko propusnom modu prikazana je slikom 1.

2. THE SECOND-ORDER GENERAL OTA-C FILTER SECTION

The second-order general OTA -C filter section operating in low-pass (LP) mode is presented in Figure 1.



Slika 1. Opća NP OTA-C filtarska sekcija drugog reda
Figure 1. The general second-order LP OTA-C filter section

2.1. Analiza šuma

Šumni model operacijskoga transkonduktantnog pojačala (OTA) predstavljen je u [4], kao i proračun šuma. Korištenjem nadomjesnoga šumnog modela izračunate su prijenosne funkcije:

$$T_x(s) = \frac{V_{OUT}}{N_x}, \quad (1)$$

gdje je s N_x u (1) naponski ili strujni izvor šuma elementa x . Efektivna vrijednost napona šuma E_n unutar određenoga frekvencijskog područja dana je s:

$$\left(E_n^2\right)_{ef} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} V_n^2(\omega) d\omega, \quad (2)$$

gdje je

where

$$V_n^2(\omega) = \sum_{k=1}^m |T_{i,k}(j\omega)|^2 (I_n)_k^2 + \sum_{l=1}^n |T_{v,l}(j\omega)|^2 (V_n)_l^2. \quad (3)$$

Posljednja jednadžba daje kvadrat spektralne gustoće napona šuma određene iz svih izvora šuma, gdje je $T_{i,k}(j\omega)$ prijenosna impedancija, tj. omjer izlaznoga napona i ulazne struje k -toga strujnog izvora šuma $(I_n)_k$, $T_{v,l}(j\omega)$ je naponska prijenosna funkcija, tj. omjer izlaznoga napona i ulaznoga napona l -toga naponskog izvora šuma $(V_n)_l$ [5]. Preko spektralne gustoće napona šuma i efektivne vrijednosti napona šuma mogu se promatrati efekti šuma.

2.2. Analiza osjetljivosti

Proračun osjetljivosti predstavljen je u [6]. U cilju usporedbe utjecaja promjene filtarskih parametara na

2.1. Noise analysis

The noise model for operational transconductance amplifiers (OTA) is given in [4], as well as the noise calculation procedure. Using the substitute noise model, the transfer functions:

are calculated, where N_x in (1) is either voltage or the current noise source of the element denoted by x . RMS noise voltage E_n within a specified frequency range is given by:

The last equation gives the square of the noise spectral density derived from all noise sources, where $T_{i,k}(j\omega)$ is the transfer impedance, i.e. the ratio of output voltage and input current of the k -th current noise source $(I_n)_k$, $T_{v,l}(j\omega)$ is the voltage transfer function, i. e. the ratio of the output voltage and input voltage of the l -th voltage noise source $(V_n)_l$ [5]. Through noise voltage spectral density and RMS noise voltage, noise effects can be observed.

2.2. Sensitivity analysis

The sensitivity calculation is given in [6]. In order to compare the influence of filter parameters variations to

amplitudni odziv filtra analizirane su osjetljivosti amplitudnoga odziva $|T(j\omega)|$ na promjene elemenata x_i . Funkcija osjetljivosti S određena je s:

the filter amplitude response, the sensitivities of the filter amplitude response $|T(j\omega)|$ to the variation of elements x_i are analyzed. The sensitivity function S is defined with:

$$S_{x_i}^{|T(j\omega)|} = \frac{d|T(j\omega)|}{d x_i} \cdot \frac{x_i}{|T(j\omega)|}. \quad (4)$$

Ako je pojačanje, $\alpha(\omega)$, izraženo s:

If the gain, $\alpha(\omega)$, is expressed by:

$$\alpha(\omega) = 20 \log |T(j\omega)| \text{ [dB]}, \quad (5)$$

funkcija osjetljivosti pojačanja može se definirati kao:

the gain sensitivity function can be defined as:

$$S_{x_i}^{\alpha(\omega)} = x_i \frac{d \alpha(\omega)}{d x_i} \text{ [dB]}. \quad (6)$$

Za mjeru osjetljivosti koristi se Schoefflerova funkcija osjetljivosti $I_s(\omega)$:

As a sensitivity measure the Schoeffler sensitivity function $I_s(\omega)$ is used:

$$I_s(\omega) = \sqrt{\sum_i (S_{x_i}^{\alpha(\omega)})^2}. \quad (7)$$

Dodatno, višeparameterska mjera Schoefflerove osjetljivosti je izračunata preko:

Additionally, a multi-parameter measure of Schoeffler sensitivity is calculated with:

$$M = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \sum_i (S_{x_i}^{|T(j\omega)|})^2 d\omega. \quad (8)$$

2.3. Optimizacijski postupak

2.3. Optimization procedure

Najjednostavniji način za izračun filtarskih elemenata je postavljanje:

The simplest way for calculating filter elements values is by setting:

$$C_1 = C_2 \quad \text{and} \quad g_1 = g_2. \quad (9)$$

Iz zadanih parametara: filtra frekvencije polova, Q-faktora polova i pojačanja, svi se elementi mogu izračunati jedan za drugim

From the given filter parameters: poles frequency, poles Q-factor and gain, all elements can be calculated straightforwardly

$$\omega_p = \sqrt{\frac{g_1 g_2}{C_1 C_2}}, \quad Q_p = \frac{\sqrt{g_1 g_2}}{g_3} \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}, \quad k_A = \frac{g_4}{g_3}, \quad (10)$$

uzimajući:

using:

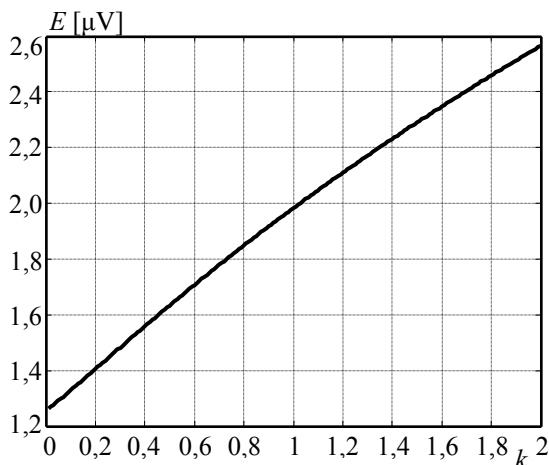
$$C_1 = k \cdot C_2 \quad \text{and} \quad g_2 = k \cdot g_1, \quad (11)$$

filtarski odzivi nisu promijenjeni, ali su neka filtarska svojstva, kao što su šum i osjetljivost, drugačija. Problem je odrediti k koji će dati najmanji šum ili najmanju osjetljivost. Kako su analitički izrazi previše složeni, problem je riješen koristeći numeričke metode i rezultati su prikazani u sljedećem primjeru.

The filter's responses are not changed, but some other properties, such as noise and sensitivity are different. The problem is to define k , which will give minimal noise or minimal sensitivity. As analytic expressions are too complex, the problem is solved using numerical methods and results are presented in following example.

2.4. Primjer

Za primjer, realiziran je NP Butterworthov filtar drugog reda s graničnom frekvencijom od 4 kHz. Numerička metoda za izračun najboljeg k u (10) koji daje najmanji šum ili osjetljivost je iterativni postupak. U području od 0,01 to 2, mijenja se k u koracima po 0,01 te se računaju pokazatelji šuma i osjetljivosti. Cilj je pronaći k koji će dati najmanji E iz (2) za minimizaciju šuma ili najmanji M iz (8) za minimizaciju osjetljivosti. Dobiveni rezultati prikazani su na slikama 2 i 3. Nažalost, ta dva faktora k nisu ista. To vodi do kompromisa u projektiranju filtra: filtar će imati ili minimalni šum ili minimalnu osjetljivost. Iz slike 2 očigledno je da će šum biti to manji što je k manji, ali uzeta je najmanja vrijednost 0,01 kako bi se spriječili veliki omjeri vrijednosti filtarskih elemenata. Produkt $E \cdot M$ izračunat je kao jedna moguća mjera optimizacije kako bi se odredio k uz istodobno optimiranje obaju parametara. Karakteristika je dana slikom 4 gdje je vidljivo da iznos k od 0,05 daje najbolji rezultat za istodobnu optimizaciju po šumu i osjetljivosti.



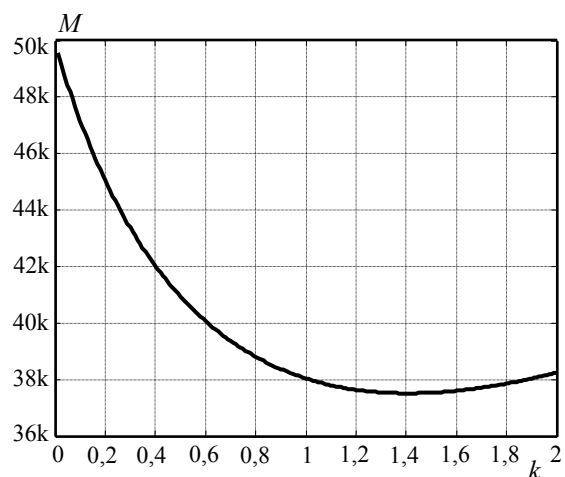
Slika 2. Efektivna vrijednost napona šuma (2) kao funkcija od k

Figure 2. RMS voltage (2) as function of k

U tablici 1 prikazane su vrijednosti filtarskih elemenata za oba pristupa izračuna. Prva kolona daje vrijednosti za jednostavan proračun, druga kolona za optimizaciju po šumu, treća kolona za optimizaciju po osjetljivosti, a četvrta kolona daje vrijednosti uz obje optimizacije. Brojčani pokazatelji E i M izračunati su unutar frekvencijskoga opsega 40 Hz – 40 kHz.

2.4. Example

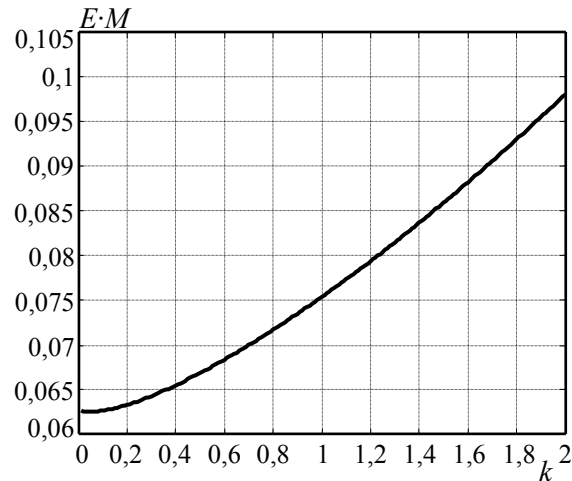
For example, a second order LP Butterworth filter with a 4 kHz cut-off frequency is realized. The numerical method for calculating the best k in (10), which gives minimal noise and/or sensitivity, is an iterative procedure. In the range of 0.01 to 2, k is changed in steps of 0.01, and noise and sensitivity markers are calculated. The goal is to find k that will give minimal E from (2) for noise minimization or minimal M from (8) for sensitivity minimization. The obtained results are presented in Figures 2 and 3. Unfortunately, those two factors k are not identical. This leads to a compromise in filter design, the filter will have either minimal noise or minimal sensitivity. From Figure 2 it is obvious that noise will be lower as factor k is lower, but the minimal value of 0,01 is used to prevent a huge ratio between the values of filter elements. A product of $E \cdot M$ as one possible measure is calculated to find k for both optimizations and the result is presented in Figure 4. The obtained characteristic of k gives the ratio of 0.05 as that which is best for minimum noise and sensitivity at the same time.



Slika 3. Višeparametarska mjera osjetljivosti (8) kao funkcija od k

Figure 3. Multi-parameter sensitivity measure (8) as function of k

In table 1, values of the filter elements are presented for the two design approaches. The first column gives values from simple calculation, the second column gives values from optimization over noise, the third column from optimization over sensitivity and the fourth column from both optimizations. Numerical indicators E and M are calculated over the frequency range 40 Hz - 40 kHz.

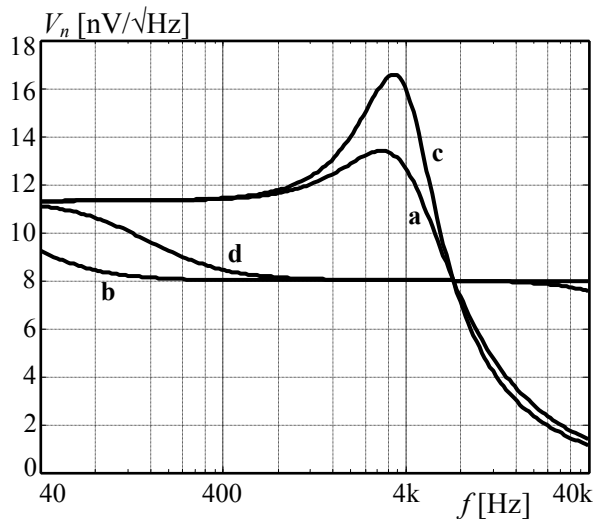


Slika 4. Produkt $E \cdot M$ kao funkcija od k
 Figure 4. Product $E \cdot M$ as function of k

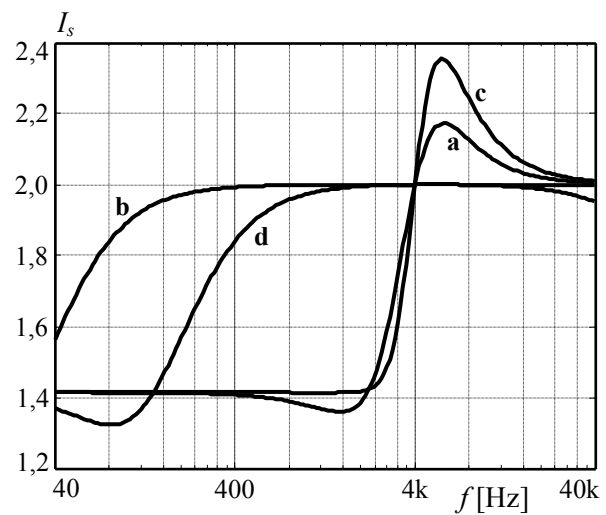
Tablica 1. Elementi filtra 2. reda: s jednostavnim proračunom (SD), uz optimizaciju šuma (NO), uz optimizaciju osjetljivosti (SO) te uz optimizaciju i šuma i osjetljivosti (NSO)

Table 1. Elements of simply designed (SD), noise optimized (NO), sensitivity optimized (SO) and noise-sensitivity minimized (NSO) of the 2nd order filter

	SD	NO	SO	NSO
k	1	0,01	1,41	0,05
C_1 [nF]	100	1	141	5
C_2 [nF]	100	100	100	100
g_1 [mS]	2,5133	2,5133	2,5133	2,5133
g_2 [mS]	2,5133	0,0251	3,5438	0,1257
g_3 [mS]	3,5543	3,5543	3,5543	3,5543
g_4 [mS]	2,5133	2,5133	2,5133	2,5133
M	38040	49582	37510	48444
E [μV]	1,9826	1,2644	2,2374	1,2916



Slika 5. Spektralna gustoća napona šuma za: a) SD, b) NO, c) SO i d) NSO filter 2. reda
 Figure 5. Noise voltage spectral density for: a) SD, b) NO, c) SO and d) NSO of the 2nd order filter



Slika 6. Schoefflerova osjetljivost za: a) SD, b) NO, c) SO and d) NSO filter 2. reda
 Figure 6. Schoeffler sensitivity for: a) SD, b) NO, c) SO and d) NSO of the 2nd order filter

Slike 5 i 6 prikazuju spektralnu gustoću napona šuma i Schoefflerovu osjetljivost za SD i optimirane filtre. Kao što se može vidjeti iz slike 5, za filter optimiran po osjetljivosti, šum je malo povećan oko granične frekvencije. S druge strane, osjetljivost je značajno povećana u propusnom području za filter optimiran po šumu. Rezultati jasno pokazuju da će vrsta optimizacije ovisiti o pojedinoj primjeni: ili se želi ostvariti filter s malim šumom ili filter s malom osjetljivošću.

3. KASKADNI NISKO PROPUSNI OTA-C FILTAR ČETVRTOG REDA

3.1. Optimizacijski postupak

Kaskadni NP OTA-C filter četvrtoga reda, ostvaren s dvije NP OTA-C filterske sekcije drugoga reda, prikazan je na slici 7. Izračun elemenata filtra četvrtoga reda može se izvršiti postavljajući:

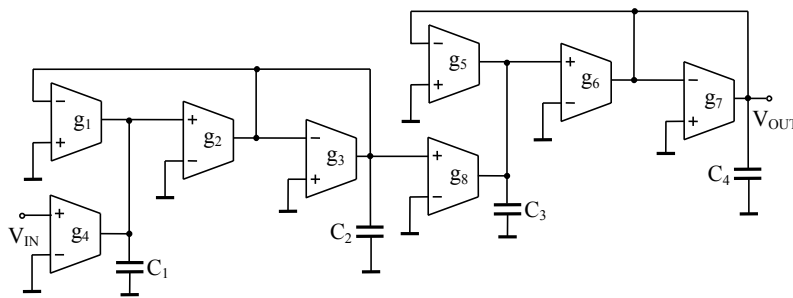
$$C_1 = C_2, \quad g_1 = g_2 \quad \text{and} \quad C_3 = C_4, \quad g_5 = g_6. \quad (12)$$

Iz zadanih filterskih parametara: frekvencije polova, Q-faktora polova i pojačanja svi se elementi mogu izračunati jedan za drugim kao kod sekcije drugoga reda. Optimizacija se može izvesti na dva različita načina. Jedan je odrediti k koji je isti za obje sekcije drugoga reda:

$$C_1 = kC_2, \quad g_2 = kg_1 \quad \text{and} \quad C_3 = kC_4, \quad g_6 = kg_5. \quad (13)$$

Drugi je način pronaći k_1 za prvu sekciju 2. reda i k_2 za drugu sekciju 2. reda iz kaskade:

$$C_1 = k_1C_2, \quad g_2 = k_1g_1 \quad \text{and} \quad C_3 = k_2C_4, \quad g_6 = k_2g_5. \quad (14)$$



Slika 7. NP OTA-C filter četvrtog reda
Figure 7. The fourth-order LP OTA-C filter

Optimizacija je provedena za oba slučaja i pokazuje se da optimizacija s dva k daje bolje rezultate, posebno na optimiranju osjetljivosti. Problem je ponovo riješen korištenjem numeričkih metoda izračuna. Kao što se očekivalo, rezultati pokazuju da smanjenje jednoga parametra povećava drugi.

Figures 5 and 6 show noise voltage spectral density and Schoeffler sensitivity for SD and optimized filters. As it can be seen from Figure 5, for the sensitivity optimized filter, the noise is slightly increased around the cut-off frequency. On the other hand, the sensitivity is significantly increased in the pass-band for the noise optimized filter. The results clearly show that the type of optimization used depends on the particular application; either a low noise filter or a low sensitivity filter is needed.

3. THE FOURTH-ORDER CASCADE LOW-PASS OTA-C FILTER

3.1. Optimization procedure

The fourth-order cascade LP OTA-C filter realized with two second order LP OTA-C filters is presented in Figure 7. In case of the fourth-order filter, the calculating of filter elements values can be done setting:

From given filter parameters: poles frequency, poles Q-factor and gains, all elements can be calculated straightforwardly, as in the case of the second order section. Optimization can be made in two different ways. One is to find k , which is the same for both second-order sections:

The other way is to find k_1 for the first 2nd order section and k_2 for the second 2nd order section in the cascade:

The optimization is performed for both cases and the case with two k 's gives better results, particularly on sensitivity optimization. The problem is again solved using numerical methods. As expected, the results show that minimization of one parameter will enlarge the other one.

3.2. Primjer

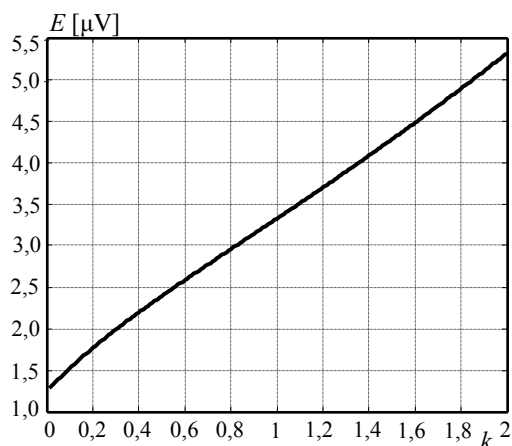
Za primjer uzet je NP Butterworthov filtar, granične frekvencije 4 kHz, izveden kao kaskada dviju sekcija drugoga reda. Numerički postupak za izračun najboljega k u (13) i (14) koji daje najmanji šum ili osjetljivost uzima k u koracima od 0,01 u području od 0,01 do 2 te računa pokazatelje šuma i osjetljivosti. Pokazatelji E i M izračunati su kao i prije. Rezultat optimizacije dan je za slučaj s različitim koeficijentima k , koji su dali bolje rezultate.

Dobiveni rezultati prikazani su slikama 8 - 10. Iz slike 8 jasno je da će šum biti manji ako je faktor k manji, ali ponovo je uzeto ograničenje na vrijednost 0,01 kako bi se spriječili preveliki omjeri među vrijednostima elemenata filtra.

3.2. Example

For example, a fourth order LP Butterworth filter with a 4 kHz cut-off frequency as a cascade of the two second-order sections is realized. The numerical method for calculating the best k in (12) and (13), which gives minimal noise or sensitivity, is an iterative procedure. In the range of 0.01 to 2, k is changed in steps of 0.01 and noise and sensitivity markers are calculated. The indicators E and M are calculated using the same relations as previously. The optimization result is presented for an approach with different k 's, which gives better optimization results.

The obtained results are presented in Figure 8 - 10. From Figure 8, it is obvious that noise will be lower as factor k is lower, but again the minimal value of 0.01 is used to prevent a huge ratio between the values of filter elements.



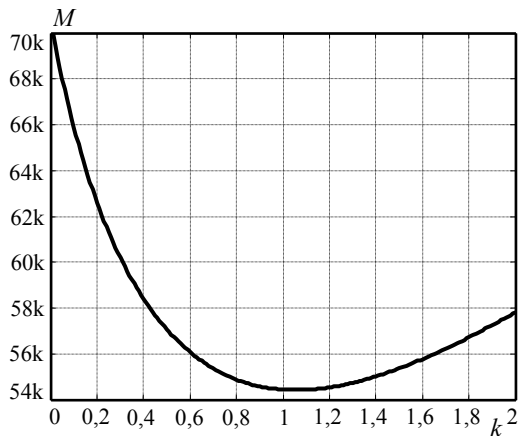
Slika 8. Efektivna vrijednost napona šuma (2) kao funkcija od k
Figure 8. RMS voltage (2) as function of k

Osjetljivost ima minimum malo nakon 1, kao što je prikazano slikom 9. Na slici 10 prikazani su rezultati uz obje optimizacije korištenjem različitih koeficijenata k .

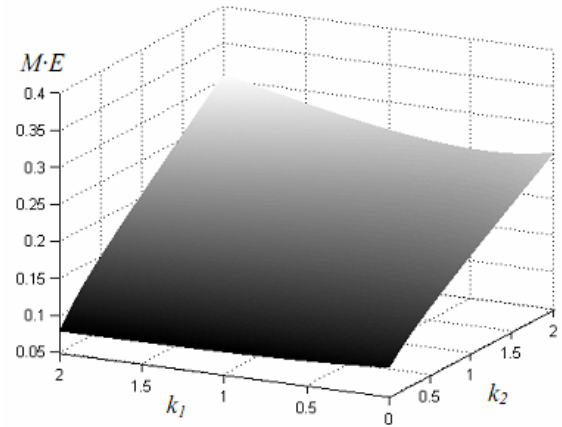
Vrijednosti elemenata filtra četvrtoga reda prikazane su u tablici 2. Prva kolona daje vrijednosti dobivene jednostavnim proračunom, druga kolona vrijednosti dobivene optimizacijom po šumu, treća kolona daje vrijednosti dobivene optimizacijom po osjetljivosti, a četvrta kolona daje vrijednosti uz obje optimizacije. Numerički pokazatelji E i M izračunati su za frekvencijski opseg 40 Hz - 40 kHz.

The sensitivity is at its minimum slightly after 1 as presented in Figure 9. Figure 10 shows the results for both optimizations using different k 's.

In Table 2, values of the fourth-order filter elements are presented. The first column gives values from simple calculation, the second column gives values from optimization over noise, the third column gives values from optimization over sensitivity and the fourth column gives values from both optimizations. If the numerical indicators E and M are calculated over the frequency range 40 Hz - 40 kHz.



Slika 9. Višeparametarska mjera osjetljivosti (8) kao funkcija od k
 Figure 9. Multi-parameter sensitivity measure (8) as function of k



Slika 10. Produkt $E \cdot M$ kao funkcija od k_1 i k_2 (tamnije je bolje)
 Figure 10. Product $E \cdot M$ as function of k_1 and k_2 (darker is better)

Tablica 2. Elementi filtra 4. reda: s jednostavnim proračunom (SD), uz optimizaciju šuma (NO), uz optimizaciju osjetljivosti (SO) te uz optimizaciju i šuma i osjetljivosti (NSO)

Table 2. Elements of the 4th order filter: of simple design (SD), with noise optimization (NO), sensitivity optimized (SO) and with noise-sensitivity optimization (NSO)

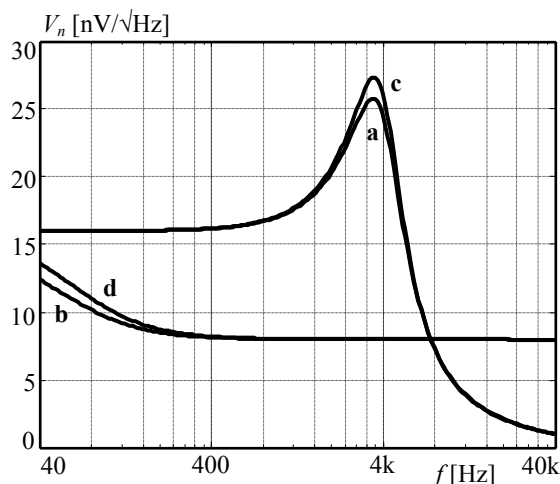
	SD	NO	SO	NSO
k_1	1	0,01	1,06	1,87
C_1 [nF]	100	1	106	187
C_2 [nF]	100	100	100	100
g_1 [mS]	2,5133	2,5133	2,5133	2,5133
g_2 [mS]	2,5133	0,0251	2,6641	4,6999
g_3 [mS]	4,6439	4,6439	4,6439	4,6439
g_4 [mS]	2,5133	2,5133	2,5133	2,5133
k_2	1	0,01	1,06	0,01
C_3 [nF]	100	1	106	1
C_4 [nF]	100	100	100	100
g_5 [mS]	2,5133	2,5133	2,5133	2,5133
g_6 [mS]	2,5133	0,0251	2,6641	0,0251
g_7 [mS]	1,9236	1,9236	1,9236	1,9236
g_8 [mS]	2,5133	2,5133	2,5133	2,5133
M	54451	69995	54421	62054
E [μ V]	3,3249	1,2773	3,4363	1,2847

Slike 11 i 12 prikazuju spektralnu gustoću napona šuma i Schoefflerovu osjetljivost za SD i optimirane filtre.

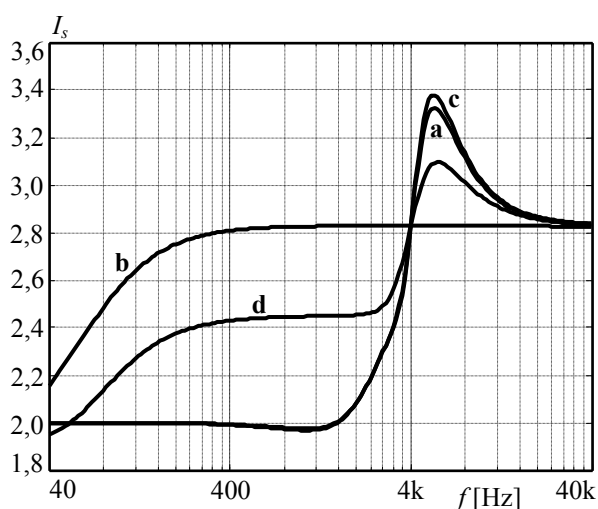
Kako se može vidjeti iz slike 11, šum je približno isti za filter optimiran po šumu i uz istodobno optimiranje po šumu i osjetljivosti. To znači da ako se izvrše obje optimizacije, šum se neće značajno povećati. S druge strane, iz slike 12 jasno je da optimiranje po osjetljivosti daje puno bolje rezultate nego istodobno optimiranje. Treba naglasiti da su od značajnog interesa rezultati postignuti u području propuštanja te oko granične frekvencije.

Figures 11 and 12 show the noise voltage spectral density and Schoeffler sensitivity for SD and optimized filters.

As it can be seen from Figure 11, the noise figures are approximately the same for the noise optimized and the noise and sensitivity optimized filter. It means that if both optimizations are used, the noise will not be significantly increased. But from Figure 12, it is obvious that sensitivity optimization gives much better results than the results obtained using both optimizations. It should be emphasized that the results in the pass-band and partly around the cut-off frequency are of crucial interest.



Slika 11. Spektralna gustoća napona šuma za: a) SD, b) NO, c) SO i d) NSO filter 4. reda
 Figure 11. Noise voltage spectral density for: a) SD, b) NO, c) SO and d) NSO of the 4th order filter



Slika 12. Schoefflerova osjetljivost za: a) SD, b) NO, c) SO and d) NSO filter 4. reda
 Figure 12. Schoeffler sensitivity for: a) SD, b) NO, c) SO and d) NSO of the 4th order filter

4. ZAKLJUČAK

Provedena je analiza niskopropusnih OTA-C filtara drugoga i četvrtoga reda u cilju određivanja funkcija šuma i osjetljivosti. Dobiveni rezultati jasno pokazuju da popravljajući jednoga promatranog parametara istodobno čini drugi lošijim. Pri tome red filtra ne utječe značajnije na rezultate: rezultati su slični bez obzira promatra li se filter drugoga ili četvrtoga reda. Optimiranje samo šuma ili istodobno šuma i osjetljivosti daje slično ponašanje karakteristike šuma. S druge strane, optimiranje osjetljivosti ili korištenje jednostavnoga proračuna elemenata daje slične karakteristike osjetljivosti. Definitivno je pokazano da se optimiranjem mogu smanjiti šum i osjetljivost, ali odabrani način proračuna elemenata filtra ovisi o pojedinoj primjeni, tj. želi li se ostvariti filter s malim šumom ili malom osjetljivošću.

4. CONCLUSION

The analyses of the second order and the fourth order low-pass OTA-C filters in order to determine noise and sensitivity functions are done. The obtained results clearly show that making better one of the observed parameters also makes the other one worse. There is no significant difference regarding filter order, the results are similar whether the second or the fourth order is analyzed. Optimizing only the noise, or noise and sensitivity at the same time, the results yield similar noise figures. On the other hand, optimizing the sensitivity or using simple design procedure will give similar sensitivity figures. Definitely, it is shown that optimization of noise and sensitivity can be done, but which design procedure will be used depends on a particular application, which is to say that this would depend on whether a filter design is needed with a low noise filter or a low sensitivity filter.

**LITERATURA
REFERENCES**

- [1] Geiger R. L, Sanchez-Sinencio E, "Active Filter Design Using Operational Transconductance Amplifiers: A Tutorial", *IEEE Circuits and Devices Magazine*, March 1985, pp. 20-32.
- [2] H. S. Malvar, Electronically Tuneable Active Filters with Operational Transconductance Amplifiers, *IEEE Trans. on Circ. & Syst.*, Vol. CAS-29, No.5, May 1982, pp. 333-336.
- [3] H. S. Malvar, Electronically Controlled Active-C Filters and Equalizers with Operational Transconductance Amplifiers, *IEEE Trans. on Circ. & Syst.*, Vol. CAS-31, No.7, July 1984, pp. 645-649.
- [4] Stojković N., Mijat N., Noise and Dynamic Range of Second Order OTA-C BP Filter Sections, *Proceedings of ECCTD '99 Int. Conf.*, 1999., Stresa, Italy, pp. 795-798.
- [5] Stojković N., Mijat N., Noise and Dynamic Range of OTA-C LP Filters, *Proceedings of MIPRO 2000 23rd Int. Conv.*, 2000., Opatija, Croatia, pp. 20-23.
- [6] N. Stojković, D. Jurišić, N. Mijat, GIC based Third-order Active Low-pass Filters, *Proc. 2nd IEEE R8-EURASIP Symposium on Image and Signal Processing and Analysis*, Pula, Croatia, 2001, pp. 486-490.

Primljeno / Received: 23.03.2010.

Prihvaćeno / Accepted: 18.06.2010.

Prethodno priopćenje

Preliminary note

Adresa autora / Authors' address

Assoc. Prof. D. Sc. Nino Stojković
Assoc. Prof. D. Sc. Saša Vlahinić
Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci
Vukovarska 58
51000 Rijeka
HRVATSKA
nino.stojkovic@riteh.hr
sasa.vlahinic@riteh.hr

Filip Tomljenović
Stube Marka Remsa 25
51000 Rijeka
HRVATSKA
filip.tomljenovic@gmail.com