

POSTUPAK DIREKTNOG PRORAČUNA PARAMETARA GENERALIZIRANIH FLF-SEKCIJA (BIKVARTNIH SEKCIJA)

Dražen Jurišić
Elektrotehnički fakultet Zagreb

Sažetak

U radu je opisan postupak direktnog proračuna parametara prijenosne funkcije uskopojasnog pojasno-propusnog (PP) filtra četvrtog reda s povratnom vezom iz već ranije poznatih parametara prijenosne funkcije PP kaskadne strukture. Dobiveni PP se realizira kao kombinacija nisko-propusne (NP) i visoko-propusne (VP) notch sekcije koje se još nazivaju generalizirane FLF-sekcije (tzv. bikvartne sekcije). Prelaskom s kaskadne na bikvartnu realizaciju, koja zadovoljava još neke dodatne zahtjeve, postignuta je znatno manja osjetljivost amplitudno-frekvencijske karakteristike na promjene parametara komponenata od kojih se sklop sastoji. Na primjeru PP filtra 8. reda koji je realiziran kaskadom NP i VP-notch sekcija napravljena je transformacija u bikvartne sekcije te je proveden proračun i analiza osjetljivosti.

DIRECT WAY OF CALCULATING PARAMETERS FOR GENERALIZED FLF-SECTIONS (BIQUARTIC SECTIONS)

Abstract

This paper presents direct way of calculating parameters in transfer function of narrow band band-pass (BP) coupled fourth order filter from parameters in transfer function of BP cascade structure. Achieved BP was realized as combination of low-pass (LP) and high-pass Notch sections that are known as generalized FLF-section (so-called Biquartic sections). By turning the cascade realization into Biquartic realization, which satisfies some more conditions, we obtain much lower sensitivities of the magnitude transfer function on changing component parameters the circuit consists of. In one example the eighth order BP filter was performed by cascading four LP-HP Notch sections, transferred to Biquartic sections and finally the calculations and sensitivity analyses were made.

1. UVOD

Prilikom projektiranja aktivnih RC filtara, vrlo je važno realizirati sekcije s minimalnom osjetljivošću na promjene parametara kao što su vrijednosti elemenata koji grade sklop. Ti se parametri mijenjaju zbog starenja, vanjskih utjecaja i sl. Da bi se minimizirala osjetljivost na takve promjene koje uzrokuju i kvantitativne promjene u prijenosnoj funkciji, prilikom projektiranja pribjegava se raznim konfiguracijama. Jedna takva konfiguracija, s minimalnom osjetljivošću na promjenu parametara je bikvartna sekcija ili generalizirana FLF-sekcija. Njena je primjena naročito interesantna u realizaciji uskopojasnih pojasno-propusnih (PP) filtara ili pojasnih brana (PB).

Bikvartna sekcija mora biti takva da njena cjelokupna prijenosna funkcija odgovara onoj prijenosnoj funkciji od koje smo pošli. U radu [1] provedena je analiza Schoefflerove osjetljivosti za bikvartnu sekciju. Schoefflerova osjetljivost je suma kvadrata osjetljivosti na promjene parametara svih elemenata koji grade sklop. Dokazano je da amplitudno-frekvencijska karakteristika uskog pojasnog propusta (PP) ili pojasne brane (PB), koji su realizirani bikvartnom sekcijom, ima minimalnu osjetljivost ako su dvije sekcije drugog reda unutar povratne veze jednake, odn. ako su im jednake $\omega_{01}=\omega_{02}=\omega_0$ (sl. 1.d). To se odnosi na osjetljivost amplitudno-frekvencijske karakteristike $S_{\omega_0}^{|T(j\omega)|}$ u odnosu na ω_0 , jer je to najdominantniji član koji pridonosi promjeni.



Stoga, ako imamo već od prije poznatu kaskadnu realizaciju PP (ili PB), bilo bi vrlo korisno pretvoriti je u kaskadu bikvartnih sekcija minimalne osjetljivosti. To se može lako napraviti pomoću gotovih formula za direktan proračun parametara koje su izvedene u ovom radu.

Dobivena kaskada bikvartnih sekcija (sl. 1.d) ima smanjenu osjetljivost u odnosu na kaskadnu realizaciju ukupnog sklopa od koje smo pošli (sl. 1.b), no nikako i minimalnu jer vjerojatno postoji neka druga konfiguracija koja bi dala još manju osjetljivost ukupnog sklopa. S druge strane, svaka bikvartna sekcija sama za sebe ima minimalnu osjetljivost. Također se smanjuje veličina Q-faktora.

U radu [2] dana je sistematska metoda za dizajniranje generaliziranih FLF aktivnih filtara.

2. PROJEKTIRANJE PP FILTARA

2.1. Opis postupka

Moguće je na više raznih načina realizirati traženu prijenosnu funkciju. Na slici 1. dan je prikaz raznih puteva i načina za realizaciju pojasnog propusta (primjer za 8. red). Kao jedno od rješenja moguća je obična kaskada (sl. 1.b), a kao drugo bolje rješenje je realizacija pomoću bikvartnih sekcija (sl. 1.d).

Najjednostavnije je na kaskadu dvije normalizirane prototipne NP sekcije 2. reda (sl. 1.a) primijeniti frekvencijsku transformaciju NP→PP

$$S \rightarrow \frac{s^2 + \omega_0^2}{Bs} \quad (1)$$

gdje je ω_0 centralna frekvencija, a B širina pojasa željenog PP.

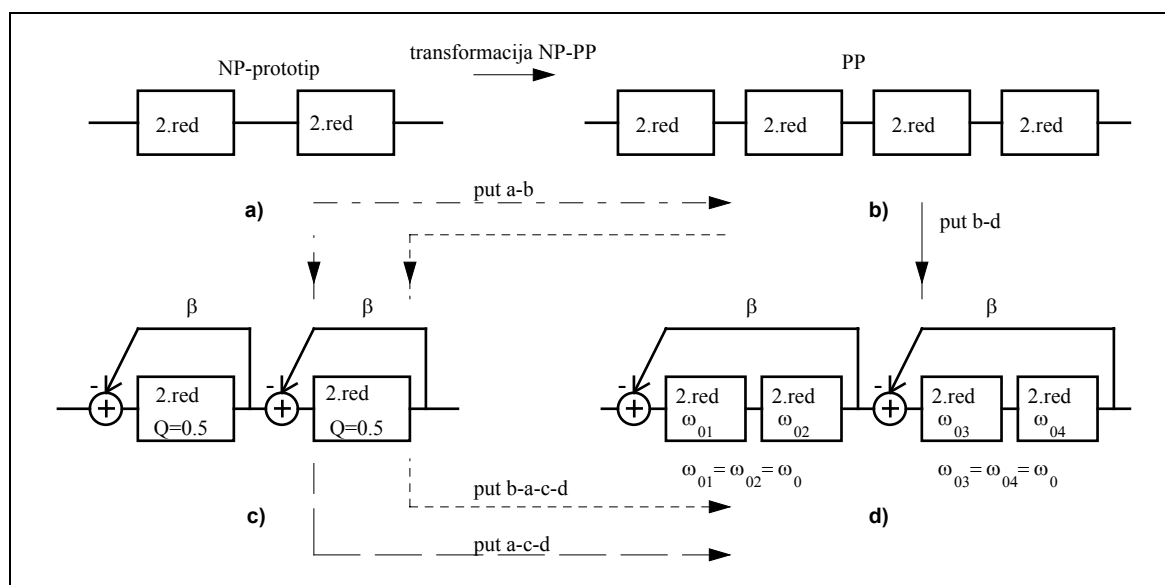
Time je dobivena PP prijenosna funkcija 8. reda što se može realizirati kao kaskada sastavljena od četiri sekcije 2. reda (put a-b). Pritom nismo vodili računa o osjetljivosti i kao realizaciju smo dobili običnu kaskadu (sl. 1.b).

U drugom slučaju želimo postići smanjenu osjetljivost pa kao rezultat dobivamo kaskadu dvije bikvartne sekcije (sl. 1.d). Najprije obadviije prototipne NP sekcije 2. reda (sl. 1.a) pretvorimo u sekcije (sl. 1.c), tako da im dodamo negativnu povratnu vezu pojačanja β , uz zahtjev da Q-faktor sekcije unutar povratne veze bude jednak 1/2 (odatle i računamo β). Zatim primijenimo (1).

U radu [1] je dokazano da ako se na NP prototip 2. reda koji ima Q-faktor jednak 1/2 primjeni frekvencijska transformacija (1) dobit će se dvije sekcije 2. reda koje su jednake. To će se dogoditi zato jer $Q > 1/2$ daje konjugirano kompleksne, $Q < 1/2$ realne i različite, a $Q = 1/2$ realne i jednake polove NP prototipne funkcije. Dakle, transformacija (1) primjenjena na prototipnu funkciju s $Q = 1/2$ će dati dvije jednake sekcije drugog reda koje imaju $\omega_{01} = \omega_{02} = \omega_0$ (sl. 1.d). To je put a-c-d.

Ako krenemo obratnim putem pa pretpostavimo da imamo bikvart s dvije sekcije drugog reda koje su jednake (tj. imaju $\omega_{01} = \omega_{02} = \omega_0$), dobili smo situaciju kao da smo na NP prototip s $Q = 1/2$ s negativnom povratnom vezom b (sl. 1.c) primijenili transformaciju (1). Time smo dobili smanjenu osjetljivost.

Pretpostavimo da imamo zadanu PP (ili PB) prijenosnu funkciju realiziranu kao kaskada na slici 1.b. Ako želimo doći do realizacije sa smanjenom osjetljivosti kao na slici 1.d trebalo bi prevaliti put b-a-c-d, tj. izvršiti transformaciju PP→NP, zatim kaskadnu realizaciju pretvoriti u bikvartnu



Sl. 1. Razni postupci u projektiranju PP filtra 8. reda

- a) NP prototip; b) Kaskadna realizacija PP filtra; c) NP prototip s povratnom vezom identičan prototipu na slici a; d) Dvije bikvartne sekcije u kaskadi realiziraju željeni PP filter.

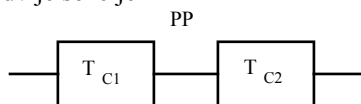
realizaciju (uz uvjet da je unutarnji $Q=1/2$) i na kraju oped izvršiti transformaciju NP→PP.

Kraći put je jednostavno iz konfiguracije na slici 1.b direktno izračunati parametre za realizaciju konfiguracije na slici 1.d, što je i tema ovog rada.

Sve potrebne formule za taj put b-d su izvedene i to za PP ili PB 4.stupnja realiziranu kaskadom para NP i VP notch-sekcije. Primjenom ovog postupka je lako svaku takvu simetričnu kaskadnu realizaciju 4, 8, odn. 16. stupnja pretvoriti u kaskadu sastavljenu od 1, 2, odn. 4 bikvartne sekcije i time znatno smanjiti osjetljivost ukupne prijenosne funkcije.

2.2. Postupak direktnog proračuna parametara za bikvartnu realizaciju PP prijenosne funkcije 4. stupnja

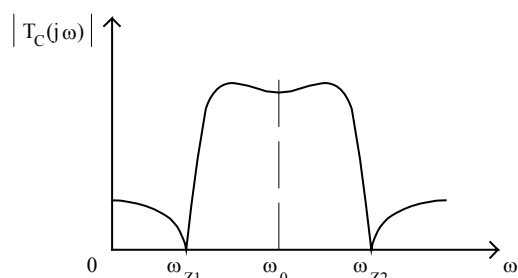
Neka je zadana prijenosna funkcija simetričnog PP filtra 4. reda koji je realiziran kao kaskada dvije sekcije



Sl. 2. PP 4. red

Pri tome je $\omega_{Z1} < \omega_0$ pa je T_{C1} notch sekcija tipa VP, dok je kod sekcije T_{C2} $\omega_{Z2} > \omega_0$ pa je to notch sekcija tipa NP. Amplitudno-frekvencijska karakteristika $|T_C(j\omega)|$ prikazana je na slici 3. a prijenosna funkcija $T_C(s)=T_{C1}(s)T_{C2}(s)$ dana je jednadžbom

$$T_C(s) = \frac{k_{C1}(s^2 + \omega_{Z1}^2)}{s^2 + \frac{\omega_{01}}{q}s + \omega_{01}^2} \cdot \frac{k_{C2}(s^2 + \omega_{Z2}^2)}{s^2 + \frac{\omega_{02}}{q}s + \omega_{02}^2} \quad (2)$$



Sl. 3. PP amplitudno-frekvencijska karakteristika koju želimo realizirati

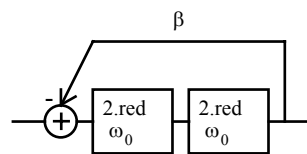
Zbog simetričnosti karakteristike frekvencija ω_0 je geometrijska sredina frekvencija ω_{01} i ω_{02} odn. ω_{Z1} i ω_{Z2} , tj.:

$$\omega_{01}\omega_{02} = \omega_0^2 \quad (3)$$

$$\omega_{Z1}\omega_{Z2} = \omega_0^2 \quad (4)$$

Želimo kaskadu sa slike 2. nadomjestiti bikvartnom sekcijom na slici 4. kako bismo smanjili osjetljivost. Moramo sačuvati ukupnu

prijenosnu funkciju, tj. $T_B(s)=T_C(s)$. Prijenosne funkcije vezane uz bikvartnu sekciju dane su s (5) i (6).



Sl. 4. Bikvartna sekcija

$$T_B(s) = \frac{T_{B1}T_{B2}}{1 + \beta T_{B1}T_{B2}} \quad (5)$$

gdje su pojedini članovi:

$$T_{Bi}(s) = \frac{k_{Bi}(s^2 + \omega_{Zi}^2)}{s^2 + \frac{\omega_{0i}}{q_0}s + \omega_{0i}^2} ; \quad i = 1,2 \quad (6)$$

Uvrštenjem jednadžbi (6) u (5), izjednačavanjem s (2) i uspoređivanjem koeficijenata koji množe pojedine potencije od s dobije se sustav jednadžbi.

Uvedimo oznaku za faktor povratne veze

$$F = 1 + \beta k_{B1}k_{B2} \quad (7)$$

Nakon kraćeg računanja dobit ćemo kvadratnu jednadžbu po F:

$$aF^2 + bF + c = 0 \quad (8)$$

gdje su pojedini koeficijenti:

$$a = \frac{(\omega_{01} + \omega_{02})^2}{4q^2} \quad (9)$$

$$b = -\left(\omega_{01}^2 + \omega_{02}^2 - \omega_{Z1}^2 - \omega_{Z2}^2 + \frac{\omega_{01}\omega_{02}}{q^2}\right) \quad (10)$$

$$c = -(\omega_{Z1} - \omega_{Z2})^2 \quad (11)$$

Koeficijenti a , b , c se formiraju od parametara kaskadne realizacije ω_{01} , ω_{02} , q , ω_{Z1} , ω_{Z2} , k_{C1} , k_{C2} . Faktor povratne veze F se dobije kao jedno (pozitivno) rješenje kvadratne jednadžbe (8), dok se drugo rješenje odbacuje (zato jer F negativno nema smisla)

$$F = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (12)$$

Kao rješenje sistema jednadžbi izračunavamo vrijednosti $\beta k_{B1}k_{B2}$ i q_0 . Na kraju izrazimo parametre bikvartne sekcije

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_{01}\omega_{02}} \quad (13)$$

$$q_0 = \frac{2q\sqrt{\omega_{01}\omega_{02}}}{(\omega_{01} + \omega_{02})F} \quad (14)$$

$$k_{B1}k_{B2} = Fk_{C1}k_{C2} \quad (15)$$

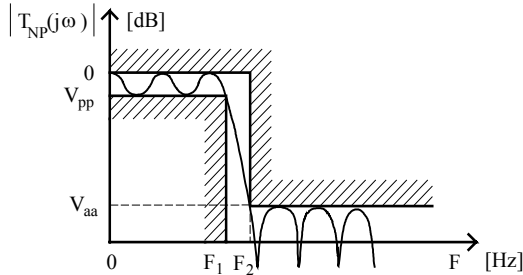
$$\beta = \frac{F - 1}{Fk_{C1}k_{C2}} \quad (16)$$

Nule (ω_{Z1} i ω_{Z2}) se jednostavno prepisu.

2.3. Primjer

Neka je zadana specifikacija na slici 5. kojom je definiran NP prototip. Treba realizirati pojasno propusni filter kao kaskadu i pomoću bikvartnih sekcija te izvršiti analizu Schoefflerove osjetljivosti za obadvije konfiguracije.

$V_{pp} = -0.5\text{dB}$	$F_1 = 1\text{Hz}$
$V_{aa} = -36.2513154\text{dB}$	$F_2 = 1.5\text{Hz}$



Sl. 5. Specifikacija NP prototipa

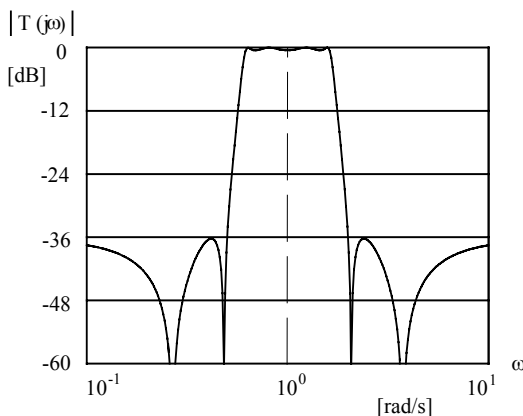
Iz zadane specifikacije uz upotrebu tablica (ili računala) dobivamo parametre NP prototipa koji je reda $N=4$, a ima prijenosnu funkciju oblika (2).

$k_{C1} = 0.1240844$	$k_{C2} = 0.1240844$
$\omega_{01} = 0.686896$	$\omega_{02} = 1.029776$
$\omega_{Z1} = 3.478406$	$\omega_{Z2} = 1.592342$
$q_1 = 0.746622$	$q_2 = 4.038945$

Sada primjenimo (1) na prototipnu prijenosnu funkciju uz centralnu frekvenciju $\omega_0 = 1$ i širinu pojasa propuštanja $B = 2\pi(F_g - F_d) = 1$. Time smo dobili PP prijenosnu funkciju 8. reda koja ima slijedeće parametre

$k_{C1} = k_{C2} = k_{C3} = k_{C4} = 0.3522584$	
$\omega_{01} = 0.7720366$	$\omega_{03} = 0.6115869$
$\omega_{Z1} = 0.2669942$	$\omega_{Z3} = 0.4820653$
$\omega_{02} = 1.295275$	$\omega_{04} = 1.635091$
$\omega_{Z2} = 3.745399$	$\omega_{Z4} = 2.074408$
$q_1 = 2.247066$	$q_2 = 8.811827$

a njena amplitudno-frekvencijska karakteristika je dana na slici

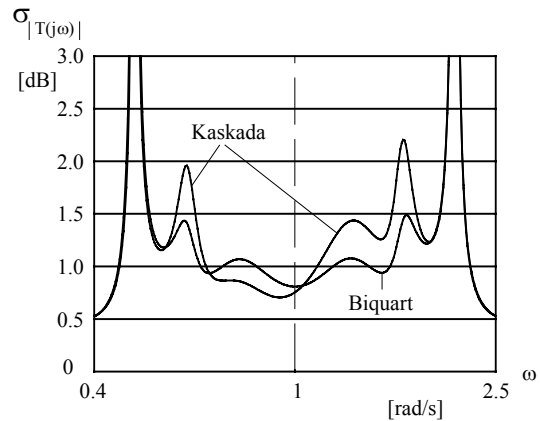


Sl. 6. Amplitudno-frekvencijska karakteristika PP

Ovu prijenosnu funkciju možemo realizirati kao kaskadu četiri sekcije 2. reda (sl. 1.b). Koristeći (8),(9),..., (16) napravimo direktan proračun parametara (put b-d) za realizaciju iste prijenosne funkcije pomoću dvije bikvartne sekcije (sl. 1.d). Parametri za bikvartnu realizaciju su

$k_{B1} = k_{B2} = 0.1267645$	$k_{B3} = k_{B4} = 0.4575988$
$\omega_{01} = \omega_{02} = 1.$	$\omega_{03} = \omega_{04} = 1.$
$\omega_{Z1} = 0.2669942$	$\omega_{Z3} = 0.4820653$
$\omega_{Z2} = 3.745399$	$\omega_{Z4} = 2.074408$
$q_{01} = 2.127967$	$q_{011} = 4.648450$
$\beta_1 = 0.1702832$	$\beta_{11} = 3.2833018$

Schoefflerova osjetljivost u području propuštanja za obadvije realizacije upotrijebljena je kao mjera za proračun približne standardne devijacije amplitudno-frekvencijske karakteristike uz pretpostavku da su varijacije svih pasivnih elemenata $\Delta x/x$ nekorelirane normalne varijable s očekivanjem nula i standardnom devijacijom 1%.



Sl. 7. Osjetljivost dizajniranih filtera

3. ZAKLJUČAK

Kao što se vidi iz primjera, osjetljivost realizacije pomoću bikvartnih sekcija je manja od osjetljivosti realizacije pomoću obične kaskade u većem dijelu pojasa propuštanja. Ako projektant želi dobiti kvalitetniji sklop manje osjetljiv na promjene parametara preporučuje se koristiti realizaciju pomoću bikvartnih sekcija gdje god postoji takva mogućnost. Pritom se može poslužiti ovdje navedenim formulama te prepraviti već postojeće kaskadne realizacije ako one postoje.

4. LITERATURA

- [1] N. Mijat, G. S. Moschytz; Sensitivity of narrowband biquartic BP active filter block, Fifth Int. Symp. on Network Theory and Design, (158-163), Sarajevo, Rujan, 1984.
- [2] J. Tow; Some results on generalized Follow-the-Leader-Feedback active filters, IEEE, Trans. on Circuits and Systems, Vol. 25, (462-465), Travanj, 1978.