

IZVEDBA REKURZIVNIH DIGITALNIH SIT S PLC KRMILNIKOM

Aleksandar Dodič¹, Rudolf Babič²

¹Lučka uprava Rijeka, Hrvatska

²Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor, Slovenija

Ključne besede: digitalna obdelava signalov, digitalni filtri, rekurzivni filtri, eliptični filtri, PLC krmilnik

Izveček: V delu je opisan postopek načrtovanja in izvedbe rekurzivnih digitalnih filtrov prve, druge in tretje stopnje s programirnim logičnim krmilnikom. Osnovni namen je izločanje neželenih signalov nizkih frekvenc pri obdelavi analognih vrednosti v sistemih industrijskega krmiljenja. Za praktično izvedbo smo uporabili PLC krmilnik SIEMENS S7-315-2DP. Predvideli smo nizkoprepustno frekvenčno karakteristiko, ki smo jo zagotovili z eliptičnim filtrom. Pri frekvenci vzorčenja 50 Hz smo mejno frekvenco izbrali pri 3 Hz. S popolnim zapisom vrednosti koeficientov filtra smo dosegli pričakovano slabljenje motilnih signalov v zapornem frekvenčnem področju 49 dB. Primerjavo med simulacijsko izvedbo, dobljeno v MATLAB programskem okolju in praktično izvedbo digitalnega filtra druge in tretje stopnje s PLC krmilnikom smo ocenili s primerjavo impulznih odzivov in njihovega odstopanja. Digitalni filter tretje stopnje smo načrtali v kaskadni obliki s strukturama prve in druge stopnje. Pri digitalnem filteru druge stopnje smo podrobno analizirali odstopanje impulznega odziva izvedenega filtra s PLC krmilnikom pri zapisu koeficientov popolni in pri zapisu v skrajšani obliki. Amplitudni frekvenčni karakteristiki sta podani za drugo in tretjo stopnjo. Amplitudna frekvenčna karakteristika je ustrezna postavljenim zahtevam. Slabljenje 40 dB dosežemo že pri dvakratni mejni frekvenci, kar je bistveno boljše kot pri filteru druge stopnje.

IIR Digital Filter Implementation With PLC Controller

Key words: Digital signal processing, Digital filters, IIR filter, Elliptic filter, PLC controller

Abstract: In this paper the design and realization of first, second and third order recursive digital filter (IIR digital filter) with PLC controller is described. The purpose of the filter structure is eliminating unwanted signals at processing of analog signals in industrial process automation with PLC controllers. In practical realization the Siemens S7-315-2DP PLC controller is used. In this application the elliptical filter is chosen, cut-off frequency was 3 Hz and sampling frequency was 50 Hz. With format long values of filter coefficients we obtain the expected stop band attenuation of 40 dB as is designed with MATLAB software. For the comparison of PLC controller realization of digital filter and simulated structure with MATLAB, the obtained values of impulse response are used. The results are summarised in Table 2 for second order digital filter for format long and shortened mode format of coefficients entry and in Table 5 for third order digital filter only for format long coefficients. In fig. 1 the magnitude response of the empiric digital filter is shown for different values of smoothing parameter k . In fig. 2, 3 and 6 the masks as a part of the organization block of Siemens PLC controller for entry of the coefficients and input variables for the first, second and third order digital filter structure are presented. In fig. 4 the magnitude frequency response of 2nd order low pass elliptic IIR filter with cut-off frequency of 3 Hz is shown. The third order recursive filter is designed as cascaded form with cascade structures of the first and the second order. For this operation the MATLAB FDA toolbox is used for second order structure (SOS structure) calculation. The first and second order structures for elliptic recursive digital filter the SOS matrix is presented in equation (10) and in fig. 5 the general cascade realization of two structures recursive digital filter for third and also for fourth order digital filters is shown. The impulse response and the magnitude frequency response of 3rd order elliptic IIR digital filter with cut off frequency of 3 Hz are shown in Fig. 7 and 8 respectively. In comparison to the second order digital filter where the attenuation of 40 dB is obtained at 15 Hz with third order digital filter structure the attenuation of 40 dB is obtained at 7 Hz.

1. Uvod

Obdelava analognih signalov je pogosta naloga v skoraj v vsakem avtomatizacijskem procesu katerega obdelujemo s PLC krmilnikom. Analogne vhodne vrednosti, ki jih dobimo na vhodu ali kot rezultate delnih izračunov, so praviloma spremenjene zaradi raznih motenj. Tako je večkrat potrebno z dodatno opremo, programsko ali aparaturno, odpraviti motnje, da bo proces katerega krmilimo, potekal brezhibno.

Ker uporabljeni senzorji in pretvorniki ne ločijo motilnih signalov od koristnih, dobi krmilni sistem poleg koristnih signalov še neželene motilne signale. Motnje so posebej nevarne, če se frekvenca ujema z mehansko resonančno frekvenco katere od naprav v sistemu. V takih primerih postane krmilje popolnoma neuporabno. Motnje lahko odpravimo na več načinov: z analognim filtrom na vhodu krmilnika ali s programsko izvedenim digitalnim filtrom znotraj PLC krmilnika.

Analogni filter predstavlja preprost način izločanja motilnih signalov. Največ se uporablja RC vezje, včasih zadostuje le kondenzator C, saj je upornost R običajno že zajeta kot porazdeljena upornost v dolžini kablov, upornosti kontaktov, ter v notranji upornosti pretvornika in vira signala. Težave nastopajo, če se spremeni upornost vhodne zanke, saj se s tem spremeni tudi mejna frekvenca. Razlike so prisotne tudi pri uporabi napetostnih in tokovnih vhodov v PLC krmilnik. Pri tokovnih vhodih, ko so prisotne manjše upornosti, motnje v vhodni zanki še težje odpravimo. Pri tokovno krmiljenih virih, potrebujemo za glajenje tudi tuljave, ki pa se ne uporabljajo tako pogosto kot kondenzatorji. Zato analogno filtriranje v takih primerih ni običajno. Analogni filter postane tudi povsem neuporaben, ko bi hoteli izločiti motnje v signalih, ki predstavljajo rezultat vmesnih izračunov več različnih spremenljivk.

V članku je opisan način filtriranja z digitalnim filtrom. Digitalni filter je programsko izveden v PLC krmilniku, ki se upo-

rablja za krmiljenje osnovnega industrijskega procesa. Preproste rešitve uporabljajo algoritme za glajenje, ki delujejo kot nerekurzivni filter in se uporabljajo po iskustvenih navodilih. V našem primeru pa smo načrtali in izvedli rekurzivno obliko filtra druge in tretje stopnje z natančno določenimi parametri povezanimi z mejno frekvenco, ojačenjem v prepustnem frekvenčnem področju in slabljenjem v zapornem frekvenčnem področju. Koeficiente filtra smo izračunali s pomočjo programskega paketa MATLAB.

2. Osnovne digitalne filterske strukture

Izhodišče za oblikovanje filterske strukture sta sistemska funkcija $H(z)$ in diferenčna enačba. Za vsak linearni, časovno neodvisni diskretni sistem obstaja več enakovrednih struktur. Strukture so lahko kanonične in nekanonične oblike. Za filtersko strukturo pravimo, da je kanonične oblike, če je število zakasnilnih členov natančno enako stopnji filtra $/1/$. Nekanonične strukture običajno uporabljamo pri procesorjih z aritmetiko s fiksno vejico, ker imajo le en seštevalnik. Za izvedbo digitalnih filtrov 1. in 2. stopnje s PLC krmilnikom lahko uporabimo direktno kanonično ali direktno transponirano kanonično strukturo. Obe sta enakovredni. Razlika je le v številu seštevalnikov in množilnikov potrebnih za realizacijo. Za strukture višjih stopenj praviloma uporabljamo kaskadno $/2/$ ali vzporedno povezavo struktur 1. in 2. stopnje ne glede ali gre za rekurzivno ali nerekurzivno izvedbo.

3. PLC krmilnik

Programirni logični krmilnik (PLC) je namensko mikroročunalniško vezje, ki se uporablja na področju industrijske avtomatizacije in daljinskega vodenja procesov. V začetku so bili signali v PLC-ju le digitalni. Novejši PLC krmilniki obdelujejo digitalne in analogne signale. To pomeni, da je z njimi možno programsko izvesti tudi digitalno filtriranje. Tako izveden filter je ekvivalenten dejanskemu, fizičnemu filteru in predstavlja samostojno enoto.

3.1 Takt

Čas izvajanja enega takta je zelo pomemben kriterij za oceno hitrosti PLC krmilnika. Njegov podatek podaja informacijo o času, potrebnem za opravilo vseh funkcij v določenem času. Izvajanje programa PLC krmilnika je ciklično, to pomeni, da se spremembe vrednosti spremenljivk znotraj enega takta programa ne bodo upoštevale in izvedle.

3.2 Ciklična prekinitve

Če želimo zelo hitro obdelavo nekaterih signalov ali funkcij, npr. alarmov, PID regulatorjev itn., lahko uporabimo različne sheme izvajanja programa s pomočjo prekinitvenih funkcij. Te nam omogočajo direkten pristop do vhodnih in izhodnih spremenljivk in tudi sprotno obdelavo, ne glede na osnovni takt PLC programa. Način pristopa do teh funk-

cij je različen pri različnih proizvajalcih PLC-jev in tudi programske opreme. Običajno obstajajo specialne procedure oz. bloki, ki omogočajo prekinitve krmiljene z dogodki ali pa so prekinitve krmiljene časovno.

Ciklično prekinitve lahko izvedemo na več načinov, pri vezju S7-300/400 je zagotovljena z organizacijskim blokom OB35. Obstajata dva možna načina: v OB35 generiramo impulz katerega v glavnem programu uporabimo kot uro, ki določa periodo vzorčenja ali v OB35 pokličemo funkcijo v kateri je implementiran digitalni filter. V tem primeru je digitalni filter izveden kar v organizacijskem bljoku OB35.

Interval prekinitve OB35 mora biti daljši od časa potrebne za obdelavo funkcije, ki jo pokličemo iz OB35. Če ta pogoj ni izpolnjen, vezje S7-300/400 kliče prekinitve za obdelavo napake določene z organizacijskim blokom OB80 $/3/$.

4. Pogosto uporabljeni digitalni filtri v PLC krmilniku

Izvedba digitalnih filtrov v PLC krmilniku je dodatna naloga za inženirje, ki načrtujejo sisteme s PLC krmilniki, saj večine motilnih signalov ni mogoče odpraviti s preprostimi analognimi filterskimi vezji. Ker pa običajno ti inženirji nimajo dovolj znanja o digitalni obdelavi signalov, je v priročnikih mogoče najti nekaj vrst digitalnih filtrov, ki se uporabljajo za manj zahtevne aplikacije. Ti digitalni filtri so vedno nizkoprepustni in njihovo delovanje je določeno le s t.i. koeficientom glajenja. V nadaljevanju bomo opisali najpogostejše uporabne rešitve.

4.1 Gladilni filter s premikajočim povprečenjem

To je nerekurzivni filter, ki se uporablja za glajenje. Osnovna oblika $/4/$ je podana z

$$y[n] = \frac{1}{M} \cdot \sum_{k=0}^{M-1} x[n-k], \quad (1)$$

kjer je M število uporabljenih preteklih vhodnih vrednosti. Izhodni signal predstavlja povprečje M preteklih vhodnih vrednosti in ima zakasnitev $(M-1)/2$ taktov. Čim večji je M , tem boljše je glajenje. Ker so v praktičnih aplikacijah prisotne omejitve vezane na zakasnitev, se za M izbirajo vrednosti od 50 do 200.

Prenosno funkcijo dobimo po preureditvi (1) v obliki:

$$H(z) = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} z^{-n} = \frac{1}{M} \cdot \frac{1-z^{-M}}{1-z^{-1}} = \frac{z^M - 1}{M[z^{M-1}(z-1)]} \quad (2)$$

4.2 Empirični filter

To je izkustvena oblika digitalnega filtra v PLC aplikacijah. Uporabniku običajno ni potrebno poznati teoretičnega ozadja teorije digitalne obdelave signalov in načrtovanja filtrov. Gre za rekurzivno nizkopasovno filtersko strukturo prve stopnje, brez natančno določene frekvence vzorčenja $/5/$.

Uporaba je omejena na glajenje vhodnega signala. Spratna izhodna vrednost je določena z nastavkom:

$$Y(n) = \frac{(Y(n-1) \cdot k) + X(n) \cdot (100 - k)}{100} \quad (3)$$

Lastnosti so določene s parametrom k : pri $k=0$ ni filtriranja, pri $k=100$ pa dosežemo max. filtriranje

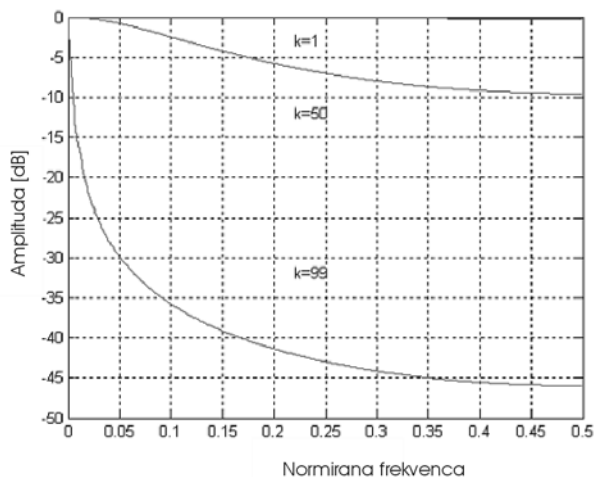
$k=0 \rightarrow Y(n) = X(n)$ - vhod direktno na izhod, ni vpliva prejšnje vrednosti izhoda

$k=99 \rightarrow Y(n) = 0.99Y(n-1) + 0.01X(n)$ - max filtriranje, vpliv vhodnega signala najmanjši

Prenosna funkcija ima za $k=1$ naslednjo obliko:

$$H(z) = \frac{99 \cdot z}{100 \cdot z - 1} \quad (4)$$

Na sliki 1 so prikazane amplitudne vrednosti frekvenčne karakteristike filtra za različne vrednosti koeficienta k .



Slika 1: Amplitudna karakteristika empiričnega filtra za različne vrednosti koeficienta k

Fig. 1: Magnitude response of the empiric filter for different values of parameter k

Frekvenca vzorčenja oz. časovne razmere v izrazu niso zajete. Zato tudi ni povezave med k in mejno frekvenco. Ker frekvenčnega spektra motilnega signala običajno niti ne poznamo, se k določi s poizkušanjem, tako da se doseže najboljši rezultat izločanja motilnih signalov. Probleme lahko pričakujemo v primerih, ko je prisoten spremenljiv čas izvajanja programa PLC-ja in ko postane večji od časa vzorčenja. V določenih razmerah lahko postane tako načrtovan filter povsem neuporaben.

4.3 Rekurzivni digitalni filter 1. stopnje

Tudi za običajno rekurzivno strukturo 1. stopnje se v preprostih aplikacijah uporabljajo približni postopki načrtovanja, ki so vezani na parameter koeficienta glajenja $/5/$. Pogosto se uporablja naslednji zapis:

$$y(n) = \frac{1}{L} \cdot (S \cdot y(n-1) + (L - S) \cdot x(n)) \quad (5)$$

Zapis je podoben nastavku (4), le da je v (5) dodatno prisoten še parameter L , ki določa občutljivost karakteristike

filtra na spremembe koeficienta S . S primerjavo (3) in (5) ugotovimo, da je S dejansko koeficient glajenja. Za L se uporabljajo vrednosti med 12 in 20, običajno je v takšnih izrazih vrednost 16. Ko uporabimo pri (5) še z -transformacijo, sledi prenosna funkcija:

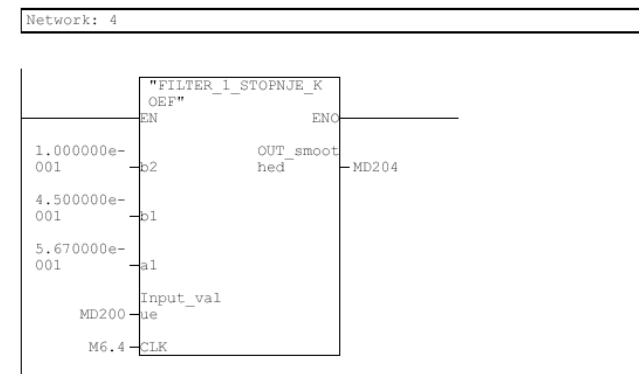
$$H(z) = \frac{L - S}{L - S \cdot z^{-1}} \quad (6)$$

S primerjavo dobljene prenosne funkcije s splošno obliko prenosne funkcije digitalnega filtra 1. stopnje v obliki,

$$H(z) = \frac{b_2 + b_1 \cdot z^{-1}}{1 + a_1 \cdot z^{-1}}, \quad (7)$$

vidimo, da je $b_2 = 0$, $b_1 = \frac{L - S}{L}$ in $a_1 = \frac{S}{L}$.

Če v editorju S7, ki je programsko orodje v Siemens-ovem programskem paketu in se uporablja za kreiranje in urejevanje struktur avtomatizacije za PLC krmilnike iz družine S7, napišemo takšno funkcijo, bomo dobili za vnos spremenljivk, oz. za branje izhodne vrednosti (v LAD načinu editorja S7) naslednjo "masko", prikazano na sliki 2:



Slika 2: Maska za vnos koeficientov za filter 1. stopnje
Fig. 2: Mask for entry of filter coefficients for 1st order filter

Vrednosti koeficientov b_2 , b_1 , a_1 , naslovi spremenljivk $Input_value$, CLK in $OUT_smoothed$, so podani le kot primer, pri dejanskem klicu funkcije bodo na teh mestih simboli «???». Če vnesemo napačni tip spremenljivke (BIT, BYTE, WORD ali REAL), editor avtomatsko zavrže takšen vnos in ga obarva rdeče.

4.4 Rekurzivni digitalni filter 2. stopnje

Vse lastnosti opisane filtra 1. stopnje, lahko razširimo tudi na filter 2. stopnje. V tem primeru se ne uporabljajo več empirične poenostavitve. Ker gre za splošen primer, ga bomo določili s koeficienti prenosne funkcije. Zanj smo uporabili sledeče zahteve: frekvenca vzorčenja $F_s = 50$ Hz, mejna frekvenca $F_m = 3$ Hz, slabljenje v prepustnem frekvenčnem področju $A_p = 1$ dB in slabljenje v zapornem frekvenčnem področju $A_s = 40$ dB.

S pomočjo MATLAB-a smo dobili naslednje vrednosti koeficientov, ki so za popolno in okrajšano obliko prikazani v

razpredelnici 1. Okrajšano obliko dobimo pri izračunu, če izpustimo inštrukcijo *format long*.

Tabela 1: Koeficienti eliptičnega IIR filtra 2. stopnje v popolni in okrajšani obliki

Table 1: Coefficients of 3rd order elliptic filter in *format long* and in shortened mode

koeficienti	Popolna oblika	Okrajšana oblika
b2	0.03679945320611	0.0367
b1	0.04153456075581	0.041534
b0	0.03679945320611	0.041534
a2	1.0	1.0
a1	1.53728291988207	- 1.53
a0	0.66646479475237	0.66

Prvih 20 vzorcev impulznega odziva simulacijskih rezultatov in praktične izvedbe digitalnega filtra s popolno in okrajšano dolžino koeficientov je skupaj z ustreznima odstopanjima podanih v razpredelnici 2.

Primerjava impulznih odzivov digitalnega filtra druge stopnje izvedenem s PLC-jem s simulacijskimi rezultati dobljenimi z MATLAB-om, pokaže, da je v primeru natančnih vrednosti koeficientov (*format long*) odstopanje zanemarljivo. Zlahka pa vidimo, da se pojavlja občutno večje odstopanje pri vnosu koeficientov v okrajšani obliki.

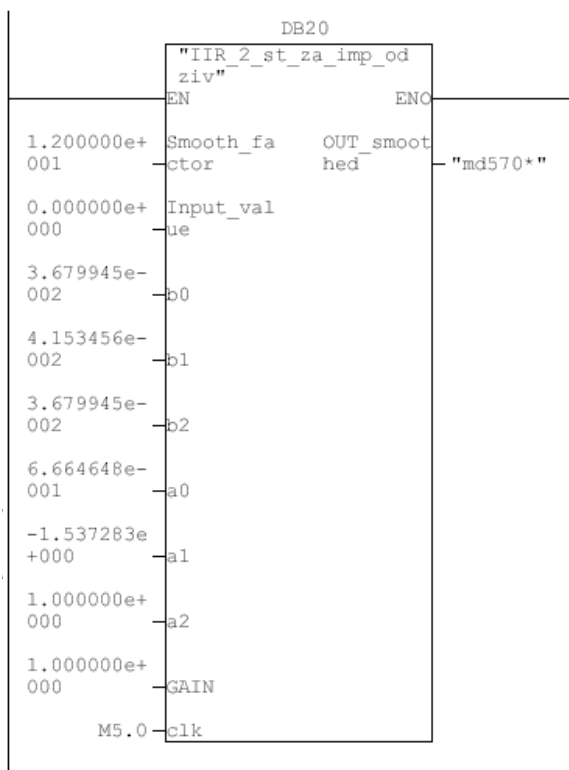
Pri izvedbi digitalnega filtra druge stopnje pride v primerjavi s filtrom prve stopnje do razlike tudi pri sami izvedbi, saj je klic funkcije oz. funkcijskega bloka možen samo iz organizacijskega bloka OB35 z asinhrono prekinitvijo. Drugače bi dobili v primeru uporabe več filtrov nestabilne rešitve zaradi prekrivanja vmesnih rezultatov. Zaradi tega je izračun izhodne vrednosti opravljen tudi s funkcijskim blokom (FB) in ne več s funkcijo (FC). Vsakemu funkcijskem bloku je priključen pripadajoči podatkovni blok (DB) v katerem so shranjene vrednosti vmesnih spremenljivk in prejšnjih izhodnih in vhodnih vrednosti. Ker je spremenljivk več, je procedura pri preslikavi spremenljivk ob koncu izračuna nekoliko bolj zahtevna. Maska za vnos koeficientov, vhodnih in izhodnih spremenljivk je prikazana na sliki 3.

Ker je v našem primeru frekvenca vzorčenja bistveno večja od mejne frekvence filtra, ni težav s prekrivanjem spektrov /6/. Frekvenčna karakteristika nizkoprepustnega eliptičnega filtra s popolnimi vrednostmi koeficientov je podana na sliki 4.

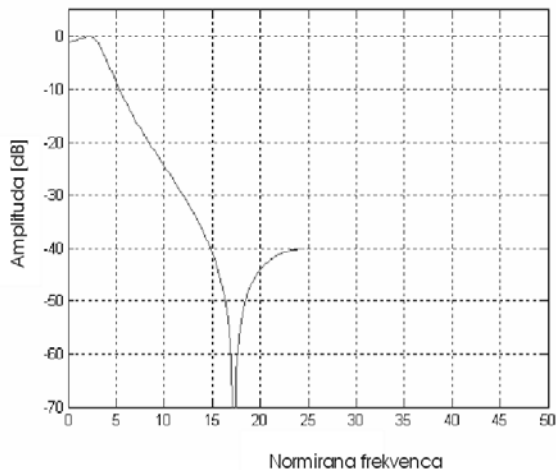
Tabela 2: Primerjava 20 vrednosti impulznega odziva digitalnega filtra druge stopnje

Table 2: The comparison of 20 values of impulse response of digital filter of 2nd degree

odtipek št.	Simulacijski rezultati (MATLAB)	Praktična izvedba digitalnega filtra s PLC-jem	Odstopanje v (%)	Praktična izvedba digitalnega filtra s PLC-jem	Odstopanje v (%)
0	36,79940	36,799400	0	36,80000	-0,001630461
1	98,10570	98,105700	0	97,83800	0,272868957
2	163,09010	163,090000	6,13158E-05	162,10400	0,604635107
3	185,33170	185,332000	-0,000161872	183,44600	1,017472996
4	176,21300	176,213000	0	173,68400	1,435194906
5	147,372000	147,373000	-0,000678555	144,66200	1,838883913
6	109,11370	109,114000	-0,000274943	106,70100	2,211179714
7	69,51980	69,519800	0	67,77200	2,514103896
8	34,15117	34,151200	-8,78447E-05	33,27470	2,566442087
9	6,16752	6,167530	-0,00016214	6,17794	-0,168949594
10	13,27933	13,279300	0,000225915	12,50900	5,80097038
11	-24,52450	24,524500	0	23,21630	5,334257579
12	-28,85090	-28,850900	0	-27,26490	5,497228856
13	-28,00700	-28,007300	-0,001071161	-26,39260	5,764273217
14	-23,82700	-23,827000	0	-22,38580	6,048600327
15	-17,96300	17,963000	0	16,83120	6,300729277
16	-11,73400	-11,734300	-0,002556673	-10,97710	6,450485768
17	-6,06728	-6,067280	0	-5,68634	6,27859601
18	-1,50661	-1,506620	-0,000663742	-1,45523	3,410305255
19	1,72754	1,727540	0	1,52648	11,63851488
20	3,65982	3,659820	0	3,29597	9,941745769



Slika 3: Maska za vnos koeficientov in vhodnih spremenljivk rekurzivnega filtra 2. stopnje
Fig. 3: Mask for entry of coefficients and input variables of 2nd order IIR filter



Slika 4: Amplitudna frekvenčna karakteristika IIR digitalnega filtra druge stopnje z mejno frekvenco 3 Hz

Fig. 4: The magnitude frequency response of 2nd order IIR filter with cut-off frequency 3 Hz

4.5 Rekurzivni digitalni filtri višje stopnje

Filtri višjih stopenj se običajno realizirajo kot kaskadna vezava več struktur prve in druge stopnje in le izjemoma v direktni obliki. Čeprav z digitalnim filtrom druge stopnje dosežemo dokaj dobre rezultate v primerjavi z opisanimi

izkustvenimi filtri, lahko s filtrom višje stopnje le dosežemo ali večje dušenje ali bolj strmo upadanje amplitudne frekvenčne karakteristike nad mejno frekvenco. Pri tem pa moramo paziti le na to, da takšen filter ne moti delovanje PLC-ja in da ne povzroča prevelike časovne zakasnitve osnovnega programa.

V našem primeru bomo prikazali izvedbo digitalna filtra tretje stopnje s katerim smo zadostili postavljenim zahtevam. Za to je potrebno uporabiti le dve kaskadni strukturi. V ta namen smo kreirali poseben funkcijski blok (FB), s katerim smo lahko analizirali obnašanje filtra.

Primerjavo med simulacijskimi rezultati, dobljenimi v MATLAB programskem okolju in praktično izvedbo s PLC krmilnikom smo ocenili s primerjavo odstopanja impulznih odzivov. Fazne razmere nam niso bile pomembne in jih nismo upoštevali. Za snemanje impulznega odziva smo modificirali funkcijski blok rekurzivnega filtra druge stopnje na način, da je bil vhod urinega impulza - «clk» - aktiven. Ta vhod je lahko aktiven, če prožimo funkcijski blok z notranjo uro, generirano v programu. Če FB pokličemo iz OB35, ta vhod ni aktiven, oz. ga moramo deaktivirati. To pomeni da smo ob vsakem proženju dobili na izhodu le eno izhodno vrednost. Pri tem je bila na vhodu vrednost 1000.0 le ob prvem ciklu, in nič pri vseh ostalih.

Načrtali, simulirali in izvedli smo eliptični IIR filter 3. stopnje. Zanj smo uporabili iste zahteve kot za filter druge stopnje.

Koeficiente filtra smo izračunali v MATLAB okolju neposredno oziroma s pomočjo FDA toolbox-a, ki je tudi del programskega paketa MATLAB. Dobljeni koeficienti v popolni obliki so za eliptični filter prikazani v razpredelnici 3.

Tabela 3: Koeficienti eliptičnega IIR filtra 3. stopnje
Table 3: The coefficients of 3rd order elliptic filter

b3= 0,0136 426 503 0127	a3= 1,00
b2=- 0,0018 096 880 4567	a2=- 2,5336 859 770 7381
b1=- 0,0018 096 880 4567	a1= 2,2493 565 017 9860
b0= 0,0136 426 503 0127	a0= -0,6920 046 002 1359

Za pretvorbo filtra višje stopnje v kaskadno obliko smo uporabili MATLAB programsko orodje (FDA toolbox ali inštrukcijo **zp2sos**), ki nam omogočata določitev struktur druge stopnje ali SOS (second order structure) matriko v obliki:

$$SOS = \begin{bmatrix} b_{21} & b_{11} & b_{01} & 1 & a_{11} & a_{01} \\ b_{22} & b_{12} & b_{02} & 1 & a_{12} & a_{02} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ b_{2L} & b_{1L} & b_{0m} & 1 & a_{1m} & a_{0m} \end{bmatrix} \quad (8)$$

V prvi vrstici so podani koeficienti prve strukture (števec in imenovalec), v drugi druge itn. Pri tem je *m* število struktur 2. stopnje.

Če poznamo SOS matriko, zapišemo splošno obliko prenosne funkcije v obliki:

$$H(z) = g \cdot \prod_{k=1}^L \frac{b_{2k} + b_{1k} \cdot z^{-1} + b_{0k} \cdot z^{-2}}{1 + a_{1k} \cdot z^{-1} + a_{0k} \cdot z^{-2}}, \quad (9)$$

kjer je g označeno skupno ojačenje. Za digitalni filter tretje stopnje je SOS matrika naslednja:

$$SOS = \begin{bmatrix} 1,00 & 1,00 & 0,00 & 1,00 & -0,818337350 & 0,00 \\ 1,00 & -1,132649302 & 1,00 & 1,00 & -1,715348626 & 0,845622651 \end{bmatrix} \quad (10)$$

in ojačanje $g = 0,013642650301$

Za prenosno funkcijo digitalnega filtra z dvema kaskadnima strukturama,

$$H(z) = g \cdot \frac{b_{2a} + b_{1a} \cdot z^{-1} + b_{0a} \cdot z^{-2}}{1 + a_{1a} \cdot z^{-1} + a_{0a} \cdot z^{-2}} \cdot \frac{b_{2b} + b_{1b} \cdot z^{-1} + b_{0b} \cdot z^{-2}}{1 + a_{1b} \cdot z^{-1} + a_{0b} \cdot z^{-2}}, \quad (11)$$

nam SOS matrika direktno podaja vrednosti koeficientov posameznih struktur a in b . Njeni koeficienti so podani v razpredelnici 4.

Tabela 4: Koeficienti posameznih kaskadnih struktur eliptičnega IIR filtra 3. stopnje
Table 4: The coefficients of both cascaded structures for 3rd order elliptic filter

b2a	=	1,00
b1a	=	1,00
b0a	=	0,00
a1a	=	-0,818337350
a0a	=	0,00

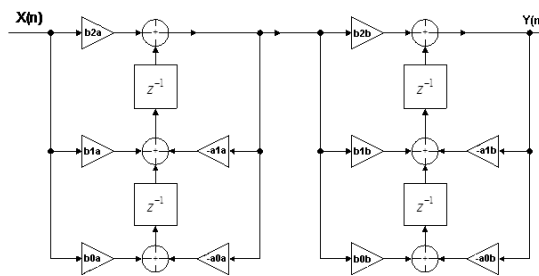
b2b	=	1,00
b1b	=	-1,132649302
b0b	=	1,00
a1b	=	-1,715348626
a0b	=	0,8456226513

Vidimo, da sta pri digitalnem filteru tretje stopnje koeficienta $b_{0a} = 0$ in $a_{0a} = 0$. Ojačanje bomo zato upoštevali pri prvi strukturi, ker ima manj koeficientov in je manj množeni.

Splošna kaskadna izvedbena oblika za rekurzivne digitalne filtre tretje stopnje je prikazana na sliki 5. Ker gre za splošno obliko z dvema kaskadnima strukturama drugih stopenj, je uporabna tudi za filter četrte stopnje.

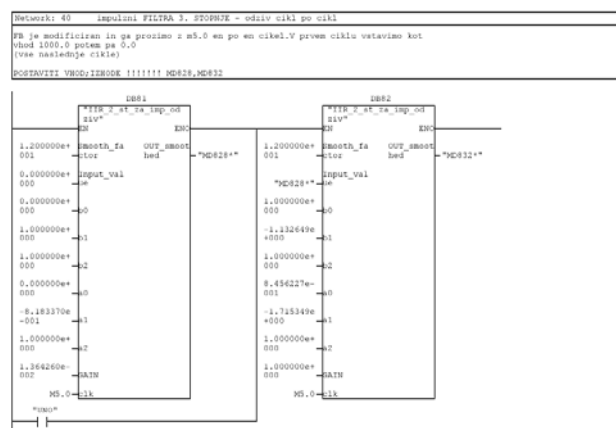
Na sliki 6 je prikazana maska za vnos koeficientov v posamezni kaskadni strukturi digitalnega filtra. Izhod iz prve strukture MD 828 je vhod v drugo strukturo. Izhod iz filtra je MD 832.

Primerjava impulznih odzivov digitalnega filtra tretje stopnje izvedenem s PLC-jem v kaskadni obliki in s simulacijskimi rezultati dobljenimi z MATLAB-om, pokaže, da je v



Slika 5: Splošna kaskadna izvedbena oblika rekurzivnega digitalnega filtra z dvema strukturama

Fig. 5: General cascade realization for two structures recursive digital filter



Slika 6: Del organizacijskega bloka OB1 digitalnega filtra s prikazom vnosa koeficientov in vhodnih spremenljivk v prvo in drugo strukturo

Fig. 6: A part of the organisation block for entry of the coefficients and input variables of 3rd order IIR filter in the first and second cascaded structure

primeru natančnih vrednosti koeficientov (format long) odstopanje zanemarljivo, kot smo to že ugotovili pri filteru druge stopnje. Prvih 20 vzorcev impulznega odziva je podanih v razpredelnici 5.

Celotni impulzni odziv izvedenega digitalnega sita s PLC-jem je prikazan na sliki 7, ustrezna frekvenčna karakteristika, ki smo jo s pomočjo MATLAB-a izračunali na osnovi impulznega odziva pa na sliki 8:

Amplitudna frekvenčna karakteristika je ustrezna postavljenim zahtevam. Slabljenje 40 dB dosežemo že pri 7 Hz, skoraj pri dvakratni mejni frekvenci, kar je bistveno bolje kot pri filteru druge stopnje, ko smo zahtevano slabljenje dosegli pri 15Hz.

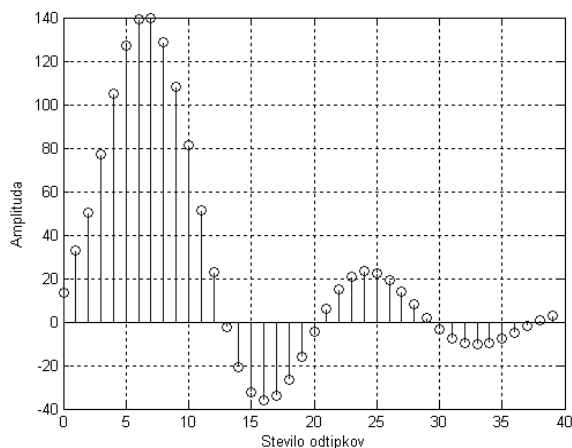
5. Zaključek

V članku smo prikazali možnosti izvedbe eliptičnega digitalnega filtra prve, druge in tretje stopnje v rekurzivni obliki s

Tabela 5: Primerjava prvih 20 vrednosti impulznega odziva digitalnega filtra tretje stopnje

Table 5: The comparison of first 20 values of impulse response of digital filter of 3rd degree

odtippek št.	Simulacijski rezultati (MATLAB)	Praktična izvedba digitalnega filtra s PLC-jem	ODSTOPANJE v %
0	13,642650301273000	13,6426	0,000368706
1	32,756503712783000	32,7564	0,000316617
2	50,497821912436000	50,4977	0,000241421
3	77,347995718632000	77,3478	0,000253036
4	105,0555793178170	105,055	0,000551439
5	127,13935612429400	127,139	0,000280105
6	139,348922212163000	139,349	-5,58223E-05
7	139,83616962670000	139,783	0,0380228
8	128,70340523262500	128,703	0,000314858
9	108,10092058526500	108,101	-7,34635E-05
10	81,124851204693000	81,1248	6,31184E-05
11	51,45073780478000	51,4507	7,34776E-05
12	22,68763570368100	22,6877	-0,000283398
13	-2,10893694285100	2,10885	0,004122591
14	-20,77181759385600	20,7717	0,000566122
15	-32,18556365668600	32,1855	0,00019778
16	-36,28428240826100	36,2843	-4,84831E-05
17	-33,91036398052200	33,9104	-0,00010622
18	-26,57448525769500	26,5746	-0,000431776
19	-16,16379328939600	-16,164	-0,00127885
20	-4,64461306675500	4,64483	-0,004670642

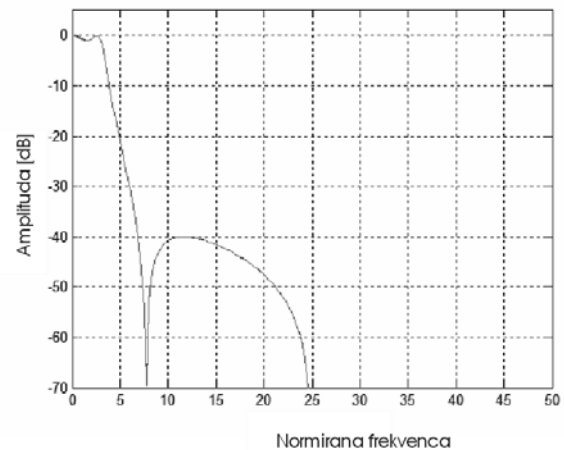


Slika 7: Impulzni odziv IIR digitalnega filtra 3. stopnje

Fig. 7: Impulse response of 3th order IIR digital filter

PLC krmilnikom. Ker senzori in pretvorniki, ki jih uporabljamo na področju avtomatizacije procesov s PLC krmilniki, ne ločijo motilnih signalov od koristnih, dobi procesni sistem poleg koristnih signalov še neželene motilne signale. Zato je potrebno z dodatno opremo, aparaturno ali programsko, odpraviti motnje, da bo proces katerega krmilimo, potekal brezhibno. Pri vedno zahtevnejših aplikacijah avtomatizacije industrijskih procesov se pojavljajo zahteve po digitalnem odpravljanju neželjenih vhodnih signalov.

Glede na to, da nas pri naših aplikacijah vpliv nelinearnega faznega kota ni problematičen, smo za filtriranje motilnih signalov izbrali rekurzivno filterno strukturo. Uporabili smo koeficiente eliptičnega filtra. Prevladalo je dejstvo, da ima za dano strmino upadanja frekvenčne karakteristike v pre-



Slika 8: Amplitudna frekvenčna karakteristika IIR digitalnega filtra tretje stopnje z mejno frekvenco 3 Hz

Fig. 8: The magnitude frequency response of 3th order IIR digital filter with cut off frequency 3 Hz

hodnem frekvenčnem področju najmanjšo stopnjo. Tudi valovitost amplitudne frekvenčne karakteristike ni bila problematična, če le upoštevamo mejne vrednosti sistema.

Pri izvedbi filterne strukture v PLC sistemu smo prikazali, da je ciklična prekinitvev pri nekaterih aplikacijah zelo pomembna, in da ne moremo vstaviti filtra v programsko zanko, če čas urinih taktov ni konstanten, če je odvisen od pogojev razvejanja osnovnega programa. Takšna odločanja znotraj programa lahko podaljšajo čas izvajanja takta tudi za velikostni razred do 10 krat.

Najprej so v delu opisani empirični filtri, ki se uporabljajo na podlagi izkušenj in ne zahtevajo poglobljenega teoretičnega znanja. V nadaljevanju pa smo prikazali postopke načrtovanje in izvedbe rekurzivnih struktur prve, druge in tretje stopnje. Struktura rekurzivnega filtra predstavlja povezavo z empiričnimi oblikami gladilnih filtrov, vendar z natančno določenimi parametri filtriranja, strukturi druge in tretje stopnje pa zahtevata posebne postopke načrtovanja in izvedbe s PLC krmilnikom. Koeficiente filtrov smo izračunali v MATLAB okolju neposredno oziroma s pomočjo FDA toolbox-a. Pri digitalnem filteru druge stopnje smo podrobno analizirali odstopanje impulznega odziva izvedenega filtra s PLC krmilnikom pri zapisu koeficientov v popolni in pri zapisu v skrajšani obliki.

Za pretvorbo filtra tretje stopnje v kaskadno obliko smo uporabili MATLAB programsko orodje, ki omogoča določitev struktur druge stopnje ali SOS (second order structure) matriko. S prikazano SOS matriko je kaskadna izvedba filtra tretje stopnje enostavno določena. S slikami so prikazani deli organizacijskih blokov PLC krmilnika s prikazom mask za vnos koeficientov in vhodnih spremenljivk v posamezne strukture digitalnih filtrov. Primerjava impulznih odzivov digitalnega filtra tretje stopnje izvedenem s PLC-jem v kaskadni obliki s simulacijskimi rezultati dobljenimi z MATLAB-om, tudi pokaže, da je v primeru natančnih

vrednosti koeficientov (format long) odstopanje zanemarljivo. Večja odstopanja se pojavijo le pri vpisovanju koeficientov v okrajšani obliki. Odstopanja so rezultat rekurzivnega izračuna izhodne vrednosti. Zato se je potrebno zapisu koeficientov v okrajšani obliki izogibati, saj v ničemer ne zmanjšuje niti aparturnih, niti časovnih zahtev. Ne glede na način zapisa koeficientov, ni bilo nevarnosti za nestabilnost izvedenih filtrov.

Tudi amplitudna frekvenčna karakteristika ustreza postavljenim zahtevam. Slabljenje 40 dB dosežemo skoraj že pri dvakratni mejni frekvenci, kar je bistveno bolje kot pri filtru druge stopnje. Pri 7 Hz in ne pri 15 Hz.

6. Literatura

- /1./ L. Milić, Z. Dobrosavljević, Uvod u digitalnu obradu signala, Elektrotehnički fakultet Beograd, 1999.
- /2./ R. Babič, Dinamika izhodnega signala pri kaskadni obliki izvedbe nerekurzivnih digitalnih sit Informacije MIDEM. - ISSN 0352-9045. - Letn. 31, št. 3 (2001), str. 152-158.
- /3./ SIEMENS S7-300 manual, programmable controller, hardware and instalation SIEMENS AG, 1998, EWA 4NEB 710 6084-002 01
- /4./ L. Milić, M. Đurić, Rekurzivni digitalni filtri, Naučna knjiga Beograd, Beograd, 1982
- /5./ Aleksandar Dodič, Izvedba rekurzivnih digitalnih sit s PLC krmilnikom, magistrska naloga, Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor, 2007.
- /6./ Sanjit K.Mitra, Digital Signal Processing-A computer Based Approach, Mc.Graw Hill, 2002.

*Mag. Aleksandar Dodič, univ. dipl. inž., Lučka uprava
Rijeka, Riva 1, 51 000 Rijeka, Hrvatska, e-mail:
sandro.dodic@portauthority.hr*

*Izr. prof. dr. Rudolf Babič, Univerza v Mariboru,
Fakulteta za elektrotehniko računalništvo in
informatiko, 2000 Maribor, Smetanova 17, Slovenija*

Prispelo (Arrived): 08.03.07

Sprejeto (Accepted): 28.5.08