

UPRAVLJANJE BANKOM REKURZIVNIH FILTARA U OBRADI SIGNALA SA DETEKTORA ZRAČENJA

Djordje Šaponjić, Vojislav Arandjelović, Institut za nuklearne nauke «Vinča»
 Milić R. Stojić, Elektrotehnički fakultet u Beogradu

Sadržaj – Opisana je novi algoritam za merenje srednje vrednosti brojanja impulsa iz detektora radioaktivnog zračenja. Novi algoritam se zasniva na metodi upravljanja bankom digitalnih IIR filtara. Algoritam uspešno rešava kompromis između oprečnih zahteva za dobrim potiskivanjem statističkih fluktuacija u stacionarnom stanju i brzog odziva na nagle promene srednje brzine brojanja.

1. UVOD

Određivanje srednjeg odbroja signala sa impulsnih detektora predstavlja jedno od osnovnih merenja u nuklearnoj instrumentaciji. Za male i srednje odbroje problem ostvarivanja zadovoljavajućeg nivoa potiskivanja fluktuacija srednjeg odbroja uz istovremeno veliku brzinu odziva mernog sistema postaje težak za rešavanje. Problem merača srednjeg odbroja je u analognoj tehnici rešavan primenom diodnog pumpnog kola i kasnije njegovim modifikacijama, da bi se ostvarile prihvatljive tačnosti i brzine odziva. Pojavom digitalnih tehnika postalo je moguće da se pored eksponencijalnog algoritma realizuje i algoritam za izračunavanje pokretne srednje vrednosti.

Do sada nije bilo pokušaja da se tehnike digitalne obrade signala primene u analizi i razvoju digitalnih merača srednjeg odbroja, iako su objavljeni u literaturi podaci o ekvivalenciji FIR i IIR filtara sa nekim od ovih algoritama [1].

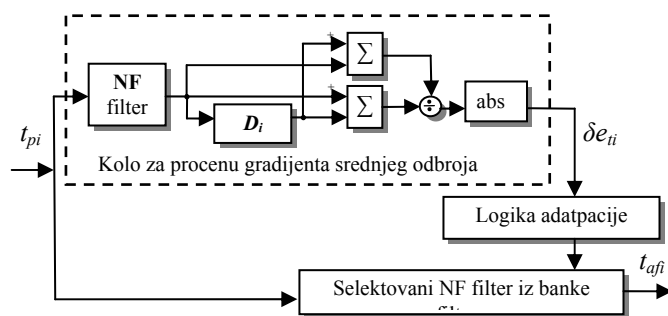
U ovom radu problem razvoja digitalnih merača srednjeg odbroja će se rešavati primenom digitalnog upravljanja bankom IIR filtara sa posebnim osvrtom na merenje malih odbroja i na mogućnost primene u prenosnim mikrokontrolerski baziranim uredjajima za zaštitu od jonizujućeg zračenja. Razmatraće se princip merenja sa predodređenim odbrojem.

2. OPIS NOVOG ALGORITMA ZA MERENJE SREDNJEG ODBROJA

U literaturi je poznat teorijski doprinos Vincenta koji je dao matematičku vezu da je zahtev za što većim nivoom potiskivanja fluktuacija direktno oprečan sa zahtevom za velikom brzinom odziva merača srednjeg odbroja [2]. Na osnovu ovih razmatranja može se zaključiti da za visoke nivoe potiskivanja fluktuacija srednjeg odbroja brzina odziva mernog sistema je mala, tj. da za merne sisteme koji poseduju veliku brzinu odziva nivo fluktuacija srednjeg odbroja je visok, što predstavlja problem pri merenju. Razmatrajući opisanu međuzavisnost brzine odziva i nivoa potiskivanja fluktuacija srednjeg odbroja nameće se jedan zaključak: da u trenucima stacionarnog stanja srednjeg odbroja sa impulsnih detektora brzina odziva sistema nije od velikog značaja i da u trenucima prelaznog procesa srednjeg odbroja sa impulsnih detektora nivo potiskivanja fluktuacija srednjeg odbroja nije od posebne važnosti. Na osnovu ovog zaključka može se predložiti novi algoritam za merenje srednjeg odbroja. Novi algoritam jasno definiše ponašanje

sistema u prelaznom procesu i nivo i način potiskivanja fluktuacija srednjeg odbroja u stacionarnom stanju.

Osnova novog algoritma se sastoji u izboru digitalnog rekurzivnog filtra iz banke filtara u zavisnosti od procenjenog gradijenta srednjeg odbroja, tj. od toga da li algoritam radi u stacionarnom stanju ili u prelaznom procesu. Blok šema strukture algoritma je data na slici 1.



Sl.1. Struktura novog algoritma za merenje srednjeg odbroja

Blok šema se sastoji od niskopropusnog (NF) filtra za usrednjavanje signala koji se selektuje iz banke filtara, kola za procenu gradijenta srednjeg odbroja rejtmetra, koje procenjuje promenu srednjeg odbroja i kola logike adaptacije koja digitalno upravlja izborom NF filtra iz banke filtara. U okviru kola za procenu gradijenta srednjeg odbroja nalazi se digitalni NF filter čiji parametri w_p , w_s i a su izabrani tako da nivo potiskivanja fluktuacija srednjeg odbroja zadovolji minimalne propisane zahteve međunarodnim standardom za instrumentaciju za zaštitu od zračenja [3]. Iza digitalnog NF filtra kojim se vrši usrednjavanje odbroja nalazi se struktura kojom se formira signal greške δe_{ii} . Sastavni deo te strukture je linija za kašnjenje D_i koja je tako realizovana da je jednake vrednosti kao vreme odziva digitalnog NF filtra. Signal greške se formira prema formuli:

$$\delta e_{ii} = \frac{|t_{pi}(n) - t_{pi}(n - D_i + 1)|}{t_{pi}(n) + t_{pi}(n - D_i + 1)} \quad (1)$$

gde je:

- $t_{pi}(n)$ usrednjeni signal sa impulsnog detektora (vreme između dva impulsa n i $n+1$) nakon digitalnog NF filtriranja,
- $t_{pi}(n-D_i+1)$ zakašnjeni usrednjeni signal za D_i sa impulsnog detektora (vreme između dva impulsa $n-D_i$ i $n-D_i+1$) nakon digitalnog NF filtriranja.

Na osnovu formule (1) može se zaključiti da signal greške δe_{ii} predstavlja absolutnu vrednost normalizovanog odstupanja od prethodne usrednjene vrednosti i predstavlja ulaz u kolo logike adaptacije, na osnovu koga algoritam digitalnog upravljanja vrši selekciju NF filtra iz banke filtara. Selektovani NF filtri u banci filtara u potpunosti zadovoljavaju kriterijum definisan zahtevima za nivoom potiskivanja fluktuacija i brzinom odziva.

Ulazni signal sa impulsnih detektora zračenja se može predstaviti kao povorka impulsa jednake amplitude čija

vremenska raspodela odgovara Poissonovskom slučajnom procesu [4]. Kako bi bilo moguće koristiti tehnike digitalne obrade signala u sistemima sa predodređenim odbrojem, neophodno je izvršiti transformaciju ulaznog signala iz kontinualnog u numerički domen, tj. formirati transformisani signal koji se sastoji od niza impulsa ravnomerno rasopredjenih, čije su amplitude definisane vremenima između dva susedna impulsa ulaznog signala. Opšti oblik gustine spektra snage (PSD) transformisanog signala je takav da se može zaključiti da je koristan deo signala za svrhu merenja srednjeg odbroja smešten u jednosmernoj komponenti, a da ostatak gustine spektra snage predstavlja fluktuaciju srednjeg odbroja. U idealnom sistemu za merenje srednjeg odbroja filter bi izdvojio samo jednosmernu komponentu, ali bi time dinamika praćenja signala u potpunosti bila izgubljena. Nakon razmatranja osobina transformisanog signala koji se obradjuje, filter koji bi bio najbolji za njegovu obradu je niskopropusni filter koja ima veliku selektivnost i veliko potiskivanje u nepropusnom opsegu. Podešavanjem učestanosti granice propusnog opsega w_p , određuje se brzina odziva, tj. nivo potiskivanja fluktuacija. U sistemima za obradu signala sa detektora zračenja nije od značaja fazna karakteristika, ali je značajno da angažovani računarski resursi budu što manji kako bi se definisani NF filter mogao realizovati na što jednostavnijim mikrokontrolerskim sistemima.

Pitanje izbora realizacije NF filtera u kolu za procenu gradijenta srednjeg odbroja je od velike važnosti, tj. da li NF filter realizovati kao rekurzivnu, IIR (sa beskonačnim impulsnim odzivom), ili nerekurzivnu, FIR strukturu (sa konačnim impulsnim odzivom). Na osnovu razmatranja u literaturi [5,6] može se definisati niz prednosti i mana u zavisnosti od oblika strukture filtera za koji se odlučimo pri realizaciji. Nakon sagledanih zahteva koje NF filter treba da zadovolji za primenu u nuklearnoj instrumentaciji i karakteristika obe realizacije strukture, može reći da prednost ima IIR filterska struktura. Za zadate specifikacije w_p , w_s i a ova struktura ima znatno niži red funkcije prenosa, tj. manje množača u strukturi, sa veoma oštrom ivicom između propusnog i nepropusnog opsega i velikim potiskivanjem u nepropusnom opsegu.

Primenom slične analize može se zaključiti da IIR filterska struktura predstavlja bolje rešenje i za banku NF filtera kojima se usrednjava signal sa detektora zračenja u odnosu na FIR filtersku strukturu.

Ništa manje značajno je odrediti koju vrstu aproksimacionog aparata koristiti u projektovanju IIR filtera. Na osnovu prethodno definisanih zahteva koje bi NF filter za usrednjavanje signala sa detektora zračenja trebalo da poseduje može se zaključiti sledeće:

- Butterworthova aproksimacija ne zadovoljava postavljene zahteve jer nema dovoljan nivo potiskivanja u nepropusnom opsegu za isti red filtera kao neka druga aproksimacija, a njena značajna osobina da ima maksimalno zaravnjenu karakteristiku u propusnom opsegu ne dolazi do izražaja jer je granica propusnog opsega w_p veoma blizu nuli,

- Čebiševljeva aproksimacija prve vrste ne zadovoljava jer ima značajnu talasnost u amplitudskoj karakteristici u propusnom opsegu. Ova osobina dovodi do sistematske greške u merenju srednjeg odbroja jer unosi grešku stacionarnog stanja. Ova aproksimacija ima značajno

potiskivanje u nepropusnom opsegu ali opisani nedostatak je izbacuje iz dalje analize,

- Čebiševljeva aproksimacija druge vrste u potpunosti zadovoljava postavljene zahteve jer ima visok nivo potiskivanja u nepropusnom opsegu i veliku selektivnost za nizak red filtera, a u propusnom opsegu ima dovoljno zaravnjenu karakteristiku da ne unosi sistematsku grešku stacionarnog stanja,

- eliptička aproksimacija ne zadovoljava jer pored dobre osobine da ima visok nivo potiskivanja u nepropusnom opsegu i veliku selektivnost, ona ima značajnu talasnost u propusnom opsegu što dovodi do sistematske greške u merenju srednjeg odbroja unošenjem greške stacionarnog stanja.

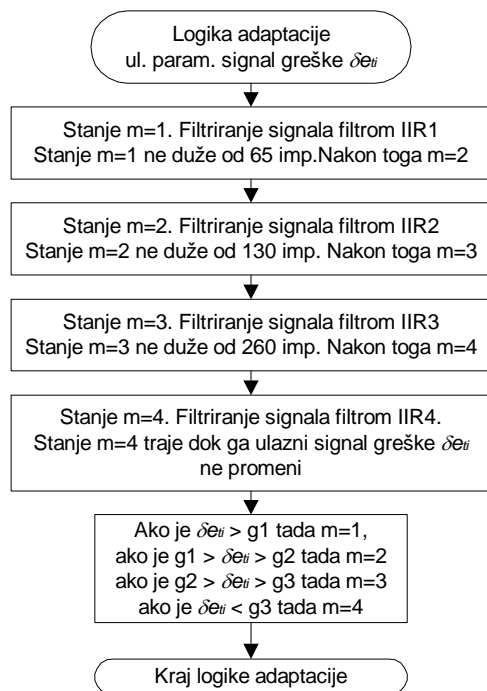
Na osnovu ovih razmatranja može se zaključiti da je za projektovanje IIR filtera u banci filtera, kao i u kolu za procenu gradijenta srednjeg odbroja, pogodno koristiti Čebiševljevu aproksimaciju drugog reda.

Za realizaciju novog algoritma za merenje srednjeg odbroja, takodje je neophodno definisati karakteristike IIR filtera u banci filtera i način izbora. Osnovne karakteristike IIR filtera se mogu definisati kroz tri gore pomenuta parametra w_p , w_s i a kojima se definiše i brzina odziva i nivo potiskivanja fluktuacija. Željena karakteristika banke filtera je da zadovoljava zahteve da je u trenucima prelaznog procesa karakteristika selektovanog filtera prilagodjena brzom odzivu, a u stacionarnom stanju karakteristika selektovanog filtera je prilagodjena što boljem potiskivanju fluktuacija srednjeg odbroja. Da bi se ovo ostvarilo, projektovana su korišćenjem Čebiševljeve aproksimacije drugog reda 2 digitalna IIR filtera koji zadovoljavaju jedan ekstremnu brzinu odziva (IIR₁), drugi ekstremno potiskivanje (IIR₄) i 2 digitalna IIR filtera koji predstavljaju prelazna stanja između ova dva ekstema (IIR₂, IIR₃). Svi projektovani filteri u banci filtera se sastoje od po jedne sekcije drugog reda realizovane kao direktna kanonička forma II i koeficijenta g kojim se vrši skaliranje.

Način izbora rekurzivnog filtera iz banke filtera je definisan algoritmom upravljanja koji je prikazan na slici 3.

Ulazni parametar u algoritam predstavlja formirana vrednost signala greške δe_n (absolutna vrednost normalizovanog odstupanja od prethodne usrednjene vrednosti koja je izlaz kola za procenu gradijenta srednjeg odbroja). Na osnovu ovog podatka vrši se diskriminacija u zavisnosti od postavljenih granica g_1 , g_2 i g_3 (u konkretnom slučaju $g_1 = 0.55$, $g_2 = 0.4$ i $g_3 = 0.35$) i generiše se izlazni parametar m koji predstavlja indeks stanja algoritma. On pokazuje koji se IIR filter iz banke filtera koristi u kom trenutku usrednjavanja odbroja sa impulsnog detektora. Znači, u algoritmu su jasno definisani trenuci kada se koriste pojedini skupovi koeficijenata, dužina trajanja jednog stanja i samim tim i nivo potiskivanja fluktuacija u svakom trenutku. Položaj postavljenih granica g_1 , g_2 i g_3 direktno definiše osetljivost algoritma na promene u srednjem odbroju. Granica g_1 određuje nivo iznad koga se indeks stanja algoritma vraća u početni položaj ($m=1$) u kome je brzina odziva najveća i za koji je nivo potiskivanja fluktuacija najniži. Podešavanjem granice g_1 definiše se sposobnost algoritma da brzo reaguje na promene srednjeg odbroja. Granica g_3 definiše nivo ispod koga je indeks stanja algoritma nalazi u krajnjem položaju ($m=4$) u kome je nivo potiskivanja fluktuacija srednjeg odbroja najveći, ali brzina

odziva sistema najniža. Granica g_2 definiše medjunivo koji ima zadatak da omogući što brži prelazak iz stanja $m=1$ u $m=4$ i time brži odziv sistema sa što višim nivoom potiskivanja fluktuacija srednjeg odbroja.



Sl. 3. Dijagram toka algoritma upravljanja izborom filtra

Opisani algoritam, zbog strukture i načina rada, može nazvati algoritmom digitalnog upravljanja bankom IIR filtara za merenje srednjeg odbroja sa impulsnih detektora zračenja.

3. ISPITIVANJE EFIKASNOSTI NOVOG ALGORITMA ZA MERENJE SREDNJEG ODBROJA

Da bi se izvršila verifikacija efikasnosti opisanog algoritma za merenje srednjeg odbroja sa impulsnih detektora, neophodno je najpre definisati testove. Testovi moraju da obuhvate ispitivanje:

- Statičkih karakteristika – rad u stacionarnom stanju
- Dinamičkih karakteristika – rad u prelaznom procesu
- Računarske efikasnosti algoritma

Statističke karakteristike algoritma se mogu ispitati ako se na sekvenci sa impulsnog detektora koja je definisana Poissonovom funkcijom raspodele nepromenljivog srednjeg odbroja izračunaju vrednosti relativne statističke devijacije i uticaj konačne sekvence na nivo potiskivanja fluktuacija.

Dinamičke karakteristike algoritma se mogu ispitati ako se na sekvenci sa impulsnog detektora, koja je definisana Poissonovom funkcijom raspodele, promeni srednji odbroj kao Heavisideova pobuda. Filtriranjem se dobija odziv na Heavisideovu pobudu. Brzina odziva je definisana kao vremenski interval dok filtrirani signal ne dostigne 90% od odziva na Heavisideovu pobudu, i za grupu algoritama sa predodređenim odbrojem se izražava u impulsima. Brzina odziva se nezavisno definiše za uzlaznu i za silaznu Heavisideovu pobudu, jer algoritmi sa predodređenim odbrojem inherentno imaju brži odziv na uzlaznu nego na silaznu Heavisideovu pobudu.

Računarska efikasnost je definisana kao veličina angažovanih računarskih resursa (memorijskih lokacija,

sabirača i množača). Na osnovu ovih vrednosti se može proceniti i koliko se brzo i efikasno mogu realizovati algoritmi i koja su fizička ograničenja u digitalnoj obradi podataka.

Takodje, neophodno je definisati i filterske algoritme sa kojima se upoređuju karakteristike algoritma digitalnog upravljanja bankom IIR filtara (u daljem tekstu AIIR). Najpre, to je tradicionalni način merenja odbroja algoritmom pokretne srednje vrednosti u sistemu predodređenog odbroja («moving average» filter). Ovaj način usrednjavanja ekvivalentan je FIR filtriranju [1]. Za ovaj tradicionalni način definisaće se dva filtra koji zadovoljavaju po jedan od dva ekstremna zahteva:

- u kome se zahteva brzi odziv na promenu srednjeg odbroja, označen sa FIR_1 (potiskivanje 14%, brzina odziva 45 imp.) i
 - u kome se zahteva veliki nivo potiskivanja fluktuacija srednjeg odbroja, FIR_2 (potisk. 3.7%, brz. odziva 630 imp.).
- Pored ovih FIR filtara mogu se za poredjenje karakteristika algoritma AIIR uzeti i IIR filtri koji zadovoljavaju gore definisane ekstremne zahteve za brzinu odziva i potiskivanje fluktuacija srednjeg odbroja, a svojim karakteristikama su slični definisanim FIR filtrima (IIR_1 i IIR_4).

Karakteristike algoritma AIIR su definisane bankom IIR filtara, a parametri digitalnog upravljanja izborom filtra iz banke IIR filtara su definisani granicama $g_1 = 0.55$, $g_2 = 0.4$ i $g_3 = 0.35$.

4. REZULTATI

Rezultati ispitivanja statičkih karakteristika se mogu sumirani u tabeli 1.

Tabela 1. Rezultati ispitivanja statičkih karakteristika

Naziv filtra	Projekt. nivo potiskivanja δe_t [%PS]	Realiz. nivo potiskivanja δe_t [%PS]	St. dev. realiz. nivoa potiskiv. $\sigma(\delta e_t)$ [%PS]
FIR_1	14.1421	14.1609	0.3671
FIR_2	3.7796	3.6902	0.3440
IIR_1	13.9875	13.9759	0.3647
IIR_4	3.899	3.9064	0.3671
AIIR	3.89 - 13.98*	4.0101	0.4309

*naveden je opseg vrednosti nivoa potiskivanja za algoritam AIIR

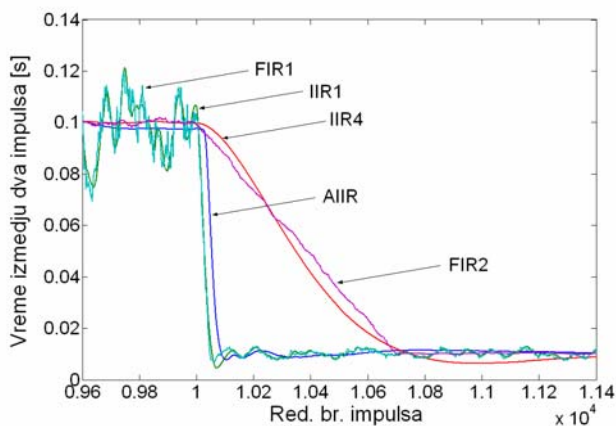
Rezultati iz tabele 1 pokazuju da ekperimentalni rezultati koji opisuju statičke karakteristike algoritama odgovaraju projektovanim vrednostima nivoa potiskivanja. Za algoritam AIIR dobijeni ekperimentalni rezultat se nalazi u projektovanom opsegu vrednosti. Idealno, nivo potiskivanja algoritma AIIR u stacionarnom stanju treba da bude jednak nivou potiskivanja IIR_4 filtra, ali usled jakih fluktuacija srednjeg odbroja algoritam digitalnog upravljanja izborom filtra iz banke IIR filtara u pojedinim trenucima donosi odluku da fluktuacije prevazilaze nivo stacionarnog stanja tako da radi brzine odziva on smanjuje nivo potiskivanja. Takodje, posmatranjem tabele 1 može se zaključiti da je uticaj konačne sekvence na filterske strukture FIR_1 , FIR_2 , IIR_1 i IIR_4 gotovo jednak, a da je uticaj značajniji na algoritam AIIR zbog osobina adaptacije na datu sekvencu i njen gradijent srednjeg odbroja.

Rezultati ispitivanja dinamičkih karakteristika sumirani su u tabeli 2.

Tabela 2. Rezultati ispitivanja dinamičkih karakteristika

Naziv filtra	Realiz. brzina odziva na uzl. Hev. pobudu	Realiz. brzina odziva na sil. Hev. pobudu
FIR ₁	45,05	50,093
FIR ₂	629,77	634,86
IIR ₁	48,54	54,9
IIR ₄	593,71	599,43
AIIR	46,19 (26,87)	51,96 (32,9)

U zagradama za algoritam AIIR dato i vreme kašnjenja koje je posledica propagacije signala kroz kolo za procenu gradijenta srednjeg odbroja. Dobijeni rezultati se slažu sa projektovanim. Radi ilustracije, na slici 3 je prikazan dinamički odziv filterskih struktura na uzlaznu Heavisideovu pobudu srednjeg odbroja sa Poissonovom raspodelom.



Sl.3. Dinamički odziv filterskih struktura na uzlaznu Heavisideovu pobudu srednjeg odbroja

Sa slike 3 se vidi da najbrži odziv na uzlaznu Heavisideovu pobudu imaju filterske strukture FIR₁ i IIR₁ jer projektovani su kao filteri brzog odziva, ali sa niskim nivoom potiskivanja fluktuacija srednjeg odbroja. Odziv algoritma AIIR je jednako brz kao i filtra IIR₁ ali je zakašnjen, što je prouzrokovano propagacijom signala kroz kolo za procenu gradijenta srednjeg odbroja. Odziv filterskih struktura FIR₂ i IIR₄ je znatno sporiji, što je očekivano i u skladu je sa projektovanim karakteristikama, tj. ovi filteri imaju visok nivo potiskivanja fluktuacija srednjeg odbroja i samim tim i veoma spor odziv sistema na Heavisideovu pobudu.

Rezultati ispitivanja računarske efikasnosti su dati u tabeli 3. Računarska efikasnost algoritma AIIR ne zaostaje puno za računarski najefikasnijim algoritmima IIR₁ i IIR₄, dok problem algoritama FIR₁ i FIR₂ je potreba za veoma značajnim memorijskim resursima.

Tabela 3. Rezultati ispitivanja računarske efikasnosti

Naziv filtra	Broj oper. množenja	Broj sabiranja ili logičkih oper.	Broj memorijskih lokacija
FIR ₁	1	50	50
FIR ₂	1	700	700
IIR ₁	6	4	2
IIR ₄	6	4	2
AIIR	12	22	16

5. ZAKLJUČAK

Predloženi novi algoritam za merenje srednjeg odbroja upravljanjem izborom rekurzivnog filtra iz banke filtara

nalazi kompromis u zahtevu za visokim nivoom potiskivanja fluktuacija srednjeg odbroja i velikom brzinom odziva prilagodjavajući se ulaznom signalu. Cena dobijanja dobrih statičkih i dinamičkih karakteristika algoritma AIIR plaća se angažovanjem većih računarskih resursa, no razvoj savremenih digitalnih sistema omogućava da se algoritam, kao što je algoritam AIIR, bez problema realizuje na bilo kom mikrokontrolerskom sistemu.

LITERATURA

- [1] Lj. Milić, A. Koturović, V. Arandjelović, «Algoritmi digitalnih merača srednje brzine brojanja kao digitalni filteri», *Elektrotehnika* 47, 1998
- [2] C. H. Vincent, «The relationship between the speed of response of a linear ratemeter and the amplitude of its random fluctuation», *Nucl. Inst. Meth.*, 23, 1963, pp. 193-196
- [3] CEI IEC 60846:2002-6, «Radiation protection instrumentation – Ambient and/or directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation», Second edition, 2002
- [4] «Particle Counting in Radioactivity Measurements», ICRU Report 52, ICRU, Bethesda, 1994
- [5] M. Popović, «Digitalna obrada signala», Nauka, Beograd, 1994
- [6] M. Schwartz and L. Shaw, «Signal Processing: Discrete Spectral Analysis, Detection, and Estimation», McGraw-Hill, 1975

Abstract – A new algorithm for measuring mean count rate of pulses coming from nuclear radiation detectors is described. The algorithm is based on a method of selecting a filter from a bank of digital IIR filters. The algorithm successfully solves the compromise between the opposing requirements for good suppression of statistical fluctuations in the steady state and fast response to a sudden change of the mean count rate.

THE CONTROL OF A BANK OF RECURSIVE FILTERS IN PROCESSING SIGNALS FROM RADIATION DETECTORS

Djordje Šaponjić, Vojislav Arandjelović, Milić R. Stojić