



(12) CERERE DE BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: a 2013 00624

(22) Data de depozit: 22.08.2013

(41) Data publicării cererii:  
29.05.2015 BOPI nr. 5/2015

(71) Solicitant:  
• LAMBDA COMMUNICATIONS SRL,  
STR. AVRAM IANCU NR. 37,  
TÂRGU MUREȘ, MS, RO

(72) Inventatori:  
• LOSONCZI LAJOS, STR.REPUBLICII  
NR.23/16, TÂRGU MUREȘ, MS, RO

(54) MODULATOR SIGMA-DELTA CU FUNCȚIA DE TRANSFER  
AL ZGOMOTULUI DE CUANTIZARE REDUS

(57) Rezumat:

Invenția se referă la un convertor analog-digital bazat pe un modulator Sigma-Delta cu funcție de transfer al zgomotului de cuantizare redus, folosit, de exemplu, pentru conversia semnalelor biologice cu spectru de frecvență relativ scăzut și amplitudine mică. Modulatorul Sigma-Delta, conform invenției, este constituit dintr-un modulator Sigma-Delta de ordinul unu, care cuprinde: un sumator (1), un etaj de integrare (2, 3) și un cuantizor de bit (5), dintr-o buclă de reacție realizată cu un alt modulator Sigma-Delta de ordinul unu, cuprinzând: un alt sumator (7), un alt etaj de integrare (8, 9) și un alt cuantizor de bit (10), semnalul de intrare al celui de-al doilea modulator fiind eroarea de cuantizare a primului modulator, și fiind obținut pe un alt sumator (6), iar ieșirea este însumată cu semnalul de ieșire al integratorului primului modulator, dintr-o buclă de compensare formată din eroarea de cuantizare a celui de-al doilea modulator, obținut pe un alt sumator (11), și două funcții (12, 13) de întârziere în serie, însumate la ieșirea primului modulator, la ieșirea circuitului astfel format obținându-se o funcție de transfer asemănătoare cu funcția de transfer a unui modulator Sigma-Delta de ordinul doi, adică un factor de transfer al zgomotului de cuantizare de ordinul doi, cu atenuare accentuată.

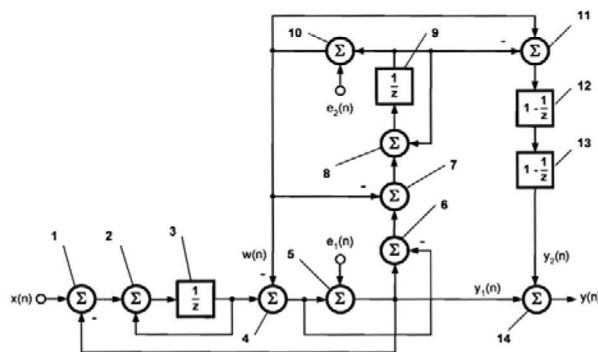


Fig. 4

Revendicări: 2  
Figuri: 4

Cu începere de la data publicării cererii de brevet, cererea asigură, în mod provizoriu, solicitantului, protecția conferită potrivit dispozițiilor art.32 din Legea nr.64/1991, cu excepția cazurilor în care cererea de brevet de invenție a fost respinsă, retrasă sau considerată ca fiind retrasă. Întinderea protecției conferite de cererea de brevet de invenție este determinată de revendicările conținute în cererea publicată în conformitate cu art.23 alin.(1) - (3).



## Modulator Sigma-Delta cu funcția de transfer a zgomotului de cuantizare redus

### Descriere:

Invenția se referă la concepția și structura unui convertor analog-digital bazat pe un modulator Sigma-Delta cu funcția de transfer a zgomotului de cuantizare redus, folosit de exemplu pentru conversia semnalelor biologice cu spectru de frecvență relativ scăzut și amplitudine mică.

Elementul critic, cel mai important al unui sistem de control numeric, reprezintă convertorul analog-digital al semnalelor măsurate. Există mai multe tipuri de convertoare analog numerice, toate trebuind să îndeplinească criteriile contradictorii: conversie cu viteză cât mai ridicată, rezoluție mare, dar în același timp și dimensiuni cât mai mici, consum cât mai puțin, și imunitate buna față de perturbații.

La aceste cerințe se adaugă nevoia de a integra convertorul analog-digital împreună cu circuitele de condiționare a semnalelor achiziționate, lucru greu de realizat, deoarece tehnologia actuală economică de realizare a circuitelor integrate digitale (CMOS) nu este adecvată pentru realizarea precisă a componentelor electronice pasive de mare precizie și de mare valoare (rezistoare, condensatoare), care reprezintă elementele cheie în realizarea convertoarelor clasice de bună calitate.

Majoritatea convertoarelor analog-numerice pot fi clasificate în două grupuri: convertoare pe frecvența Nyquist (semnalul analogic de intrare are frecvența maximă puțin sub frecvența Nyquist  $f_N = f_e / 2$ , unde  $f_e$  este frecvența de eșantionare, și convertoare cu supraeșantionare, care realizează procesul de eșantionare cu o frecvență mult mai mare,  $f_N \ll k \cdot f_e$  unde  $k \cdot f_e$  este frecvența de eșantionare a intrării iar  $k$  se numește factor de supraeșantionare.

După reducerea zgomotului de cuantizare prin filtrare digitală, volumul de date este prea mare, având o redundanță  $(k-1)$  față de rata de date necesară în cazul respectării condiției Nyquist. Datele redundante se elimină prin decimare, adică reținerea a câte unui eșantion din pachete de  $k$  eșantioane consecutive, astfel în final rezultă o rată de date cu frecvența  $f_e$ . Reducerea zgomotului de cuantizare se poate obține prin aplicarea unei tehnici adiționale, modulația Sigma-Delta. Modulatorul Sigma-Delta asociat cu supraeșantionarea și utilizarea filtrului digital, asigură scăderea puternică a zgomotului de cuantizare, între frecvențele  $\frac{f_e}{2}$  și  $k \cdot \frac{f_e}{2}$ .

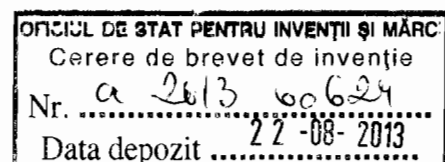
Semnalul util este separat de semnalul de zgomot datorat erorii de cuantizare, prin filtrarea și formarea zgomotului de cuantizare în buclă de reacție. Se pot obține rate ridicate (număr de biți) ale fluxului numeric la ieșire, dar nu prin utilizarea unor componente electronice foarte precise (de ex. convertoare analog-numerice și numeric-analogice de mare rezoluție), ci prin utilizarea unor convertoare simple de un bit și supraeșantionarea semnalului de intrare.

Schema de principiu a funcționării unui modulator Sigma-Delta este prezentată în figura 1. Se observă că, conține un sumator la intrare, un etaj de integrare, un comparator cu tampon la ieșire și un convertor rapid analog-numeric de un bit. Pe perioada unui ciclu de funcționare, integratorul însumează diferența între semnalul de intrare și tensiunea de referință corespunzătoare semnalului de ieșire în ciclul precedent. Deoarece semnalul de ieșire al integratorului intersectează punctul de zero al comparatorului, acesta își schimbă valoarea de ieșire, de aceea la începutul ciclului următor se schimbă polaritatea tensiunii de referință scăzută din semnalul de intrare. Astfel fluxul de biți la ieșire - eșantionat foarte rapid - încearcă să urmărească valoarea medie a semnalului de intrare.

Figura 2. reprezintă modelul modulatorului Sigma-Delta în domeniul  $z$ . Aplicând modelul de zgomot aditiv al erorii de cuantizare, obținem cu aproximație bună modelul linear al convertorului, din care se poate deduce că, semnalul de ieșire  $y$  al convertorului în momentul de timp  $i$  este:

$$y_i = x_{i-1} + (e_i - e_{i-1}) \quad (1)$$

unde  $e_i$  este eroarea de cuantizare în momentul  $i$ , iar  $e_{i-1}$  este eroarea de cuantizare în momentul precedent.



## Modulator Sigma-Delta cu funcția de transfer a zgomotului de cuantizare redus

Întradevăr, dacă semnalul de ieșire al elementului de întârziere  $\frac{1}{z}$  este "a", atunci se poate scrie că:

$$a = (x - y + a) \cdot \frac{1}{z}, \text{ deci } a = \frac{x - y}{z - 1}. \text{ Deoarece } y = a + e = \frac{x - y}{z - 1} + e, \text{ rezultă că: } y = x \cdot \frac{1}{z} + e \cdot \left(1 - \frac{1}{z}\right),$$

deci se ajunge la relația (1). În acest caz, funcția de transfer a semnalului util, respectiv a zgomotului de cuantizare va fi:

$$STF(x) = z^{-1}, \quad \text{respectiv:} \quad NTF(z) = 1 - z^{-1}.$$

Deoarece bucla integrează eroarea ce apare între semnalul eșantionat și semnalul de intrare, ea realizează o filtrare tip trece jos a semnalului și o filtrare de tip trece sus a zgomotului. Semnalul rămâne neschimbat atâta timp cât componentele sale de frecvență nu depășesc frecvența de tăiere a filtrului, dar bucla Sigma-Delta pune zgomotul într-o bandă de frecvență mai mare.

Rezultă că pentru a îmbunătăți raportul semnal/zgomot al convertorului, există două căi deschise:

a.) pentru un zgomot de cuantizare (e) de valoare dată, se micșorează funcția de transfer NTF (de exemplu prin creșterea ordinului modulatorului)

b.) pentru o funcție de transfer NTF dată, se micșorează zgomotul de cuantizare (de exemplu prin creșterea frecvenței de eșantionare)

Pentru convertoarele Sigma-Delta cu rezoluție mai mare (de la 16 biți în sus), un zgomot de cuantizare acceptabil se poate obține numai pentru frecvențe de supraeșantionare foarte mari. Soluția este de a utiliza modulatori de ordin mai înalt. Cu cât crește ordinul, cu atât rămâne mai puțin zgomot în intervalul de frecvență  $0 - \frac{f_e}{2}$ , dar totodată scade stabilitatea modulatorului.

Modulatorul de ordinul doi se obține din modulatorul de ordinul unu prin adăugarea a încă unui integrator în bucla de reacție (figura 3.). Aplicând modelul de zgomot aditiv al erorii de cuantizare, obținem caracteristica de transfer în domeniul z a convertorului de ordinul doi:

$$y = z^{-1} \cdot x + (1 - z^{-1})^2 \cdot e$$

Se observă că, în acest caz, funcția de transfer a semnalului util, respectiv a zgomotului de cuantizare va fi:

$$STF(x) = z^{-1}, \quad \text{respectiv:} \quad NTF(z) = (1 - z^{-1})^2$$

Rezultă că, caracteristica de transfer a semnalului util nu s-a modificat, dar funcția de transfer a zgomotului a devenit de ordinul doi, ceea ce înseamnă o atenuare mai accentuată a zgomotului de cuantizare. Creșterea ordinului filtrului (gradul modulatorului) nu este convenabilă datorită posibilității apariției unei nestabilități în sistem.

Se cunosc mai multe structuri pentru modulatorii Sigma-Delta, pentru conversia analog-digitală a semnalelor [1] - [21]. Acestea diferă între ele în modul de amplasare a buclilor de reacție, ordinul modulatorului, tehnologia de realizare, numărul de biți de cuantizare, rezoluție.

Aceste soluții prezintă dezavantajul unui raport semnal/zgomot relativ ridicat, complexitate excesivă a structurilor realizate, tendințe de instabilitate, sau semnal digital de ieșire multinivel.

Problemele pe care le rezolva invenția constau în: reducerea valorii funcției de transfer a zgomotului de cuantizare (NTF); creșterea preciziei de conversie fără creșterea ordinului modulatorului sau folosirea unor algoritmi de adaptare suplimentare; evitarea utilizării unui semnal digital multinivel.

Modulatorul Sigma-Delta cu funcția de transfer a zgomotului de cuantizare redus, conform invenției este alcătuit dintr-un modulator Sigma-Delta de ordinul unu, format dintr-un sumator, un etaj

## Modulator Sigma-Delta cu funcția de transfer a zgomotului de cuantizare redus

de integrare și un cuantizor de un bit; o buclă de reacție realizat cu un alt modulator Sigma-Delta de ordinul unu format dintr-un sumator, un etaj de integrare și un cuantizor de un bit, semnalul de intrare intrare al celui de al doilea modulator este eroarea de cuantizare a primului modulator, iar ieșirea este însumată cu semnalul de ieșire al integratorului primului modulator; o buclă de compensare formată din eroarea de cuantizare a celui de al doilea modulator, și două funcții de întârziere în serie, însumate la ieșirea primului modulator.

Modulatorul Sigma-Delta cu funcția de transfer a zgomotului de cuantizare redus, conform invenției, prezintă următoarele avantaje:

- raportul semnal/zgomot îmbunătățit
- stabilitate ridicată
- interefacere ușoară cu restul echipamentului digital de măsurare
- miniaturizare și portabilitate ridicată
- posibilitatea integrării echipamentului în sisteme mobile de măsurare

Se dă în continuare un exemplu de realizare a invenției, în legătură și cu figurile 1, 2 și 3, care reprezintă:

- fig.1, Schema de principiu a modulatorului Sigma-Delta de ordinul unu
- fig.2, Modelul z al modulatorului Sigma-Delta de ordinul unu
- fig.3, Modelul z al modulatorului Sigma-Delta cu funcția de transfer a zgomotului de cuantizare redus, conform invenției

Modulatorul Sigma-Delta cu funcția de transfer a zgomotului de cuantizare redus, conform invenției (figura 4.), este alcătuit dintr-un modulator Sigma-Delta de ordinul unu, format dintr-un sumator (1), un etaj de integrare (2,3) și un cuantizor de un bit (5); o buclă de reacție realizat cu un alt modulator Sigma-Delta de ordinul unu format din sumatorul (7), etajul de integrare (8,9) și cuantizorul de un bit (10). Semnalul de intrare al celui de al doilea modulator este eroarea de cuantizare a primului modulator, obținut pe sumatorul (6), iar ieșirea este însumată cu semnalul de ieșire al integratorului primului modulator; o buclă de compensare formată din eroarea de cuantizare a celui de al doilea modulator, obținut pe sumatorul (11), și două funcții de întârziere în serie (12) și (13), însumată la ieșirea primului modulator.

Ținând cont de caracteristica de transfer în domeniul z a convertorului de ordinul unu:

$$y = z^{-1} \cdot x + (1 - z^{-1}) \cdot e$$

putem să scriem următoarele ecuații pentru semnalele modulatorului prezentat în figura 3:

$$w = z^{-1} \cdot e_1 + (1 - z^{-1}) \cdot e_2$$

$$y_1 = z^{-1} \cdot x + (1 - z^{-1}) \cdot [e_1 - z^{-1} \cdot e_1 - (1 - z^{-1}) \cdot e_2] = z^{-1} \cdot x + (1 - z^{-1})^2 \cdot e_1 - (1 - z^{-1})^2 \cdot e_2$$

$$y_2 = (1 - z^{-1})^2 \cdot e_2$$

Rezultă pentru semnalul de ieșire:

$$y = y_1 + y_2 = z^{-1} \cdot x + (1 - z^{-1})^2 \cdot e_1$$

## Modulator Sigma-Delta cu funcția de transfer a zgomotului de cuantizare redus

---

La ieșirea circuitului se obține o funcție de transfer asemănătoare cu funcția de transfer a unui modulator Sigma-Delta de ordinul doi, adică funcția de transfer a zgomotului de cuantizare de ordinul doi, cu atenuare mai accentuată.

### Referințe:

- [1] Brevet USA: US Patent 6535153/18.03.2003
- [2] Brevet USA: US Patent 73395100/04.03.2008
- [3] Brevet USA: US Patent 7623053/24.11.2009
- [4] Brevet USA: US Patent 5311181/10.05.1994
- [5] Brevet USA: US Patent 5870048/09.02.1999
- [6] Brevet USA: US Patent 6087968/11.07.2000
- [7] Brevet USA: US Patent 5298900/29.03.1994
- [8] Brevet USA: US Patent 5103228/07.04.1992
- [9] Brevet USA: US Patent 6577259/10.06.2003
- [10] Brevet USA: US Patent 6696999/24.02.2004
- [11] Brevet USA: US Patent 6788232/07.09.2004
- [12] Brevet USA: US Patent 6980139/27.12.2005
- [13] Brevet USA: US Patent 7423568/09.09.2008
- [14] Brevet USA: US Patent 7443325/28.10.2008
- [15] Brevet USA: US Patent 7456771/25.11.2008
- [16] Brevet USA: US Patent 7460046/02.12.2008
- [17] Brevet USA: US Patent 7567192/28.07.2009
- [18] Brevet USA: US Patent 7777657/17.08.2010
- [19] Brevet USA: US Patent 7928876/19.04.2011
- [20] Brevet USA: US Patent 2011/0234437/29.09.2011
- [21] R. Schreier, G.C. Temes, Understanding Delta-Sigma Data converters, IEEE Press, 2005

## Modulator Sigma-Delta cu funcția de transfer a zgomotului de cuantizare redus

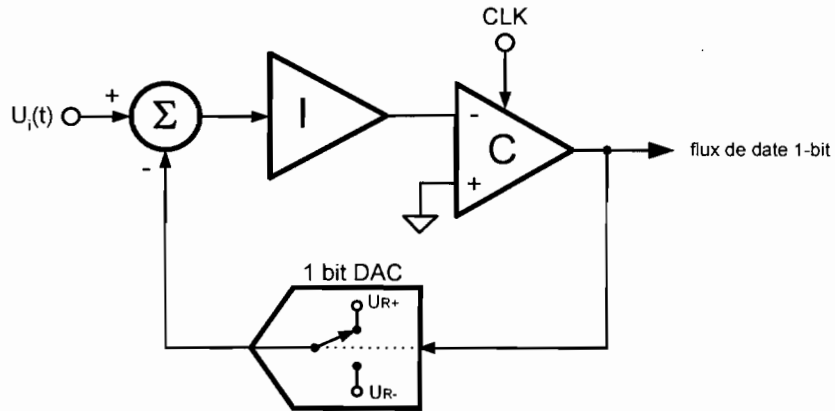
---

### Revendicări:

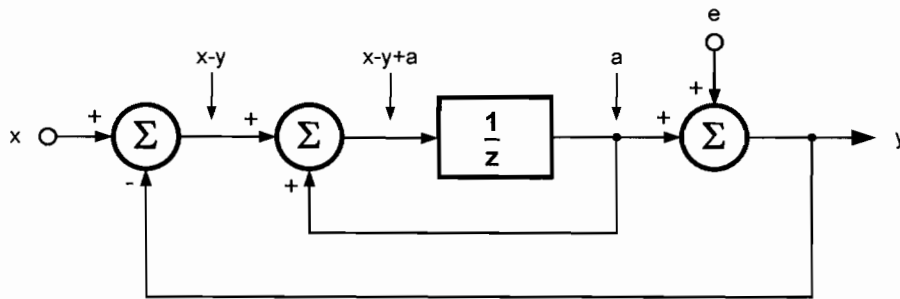
1. Modulatorul Sigma-Delta cu funcția de transfer a zgomotului de cuantizare redus, conform invenției caracterizat prin aceea că este alcătuit dintr-un modulator Sigma-Delta de ordinul unu, format dintr-un sumator (1), un etaj de integrare (2,3) și un cuantizor de un bit (5); o buclă de reacție realizat cu un alt modulator Sigma-Delta de ordinul unu format din sumatorul (7), etajul de integrare (8,9) și cuantizorul de un bit (10), semnalul de intrare al celui de al doilea modulator este eroarea de cuantizare a primului modulator, obținut pe sumatorul (6), iar ieșirea este însumată după integratorul primului modulator; o buclă de compensare formată din eroarea de cuantizare a celui de al doilea modulator, obținut pe sumatorul (11), și două funcții de întârziere în serie (12) și (13), însumate la ieșirea primului modulator.
2. Modulatorul Sigma-Delta cu funcția de transfer a zgomotului de cuantizare redus, conform invenției caracterizat prin aceea că la ieșirea modulatorului se obține o funcție de transfer asemănătoare cu funcția de transfer a unui modulator Sigma-Delta de ordinul doi, adică funcția de transfer a zgomotului de cuantizare este de ordinul doi, cu atenuare accentuată.

**Modulator Sigma-Delta cu funcția de transfer a zgomotului de cuantizare redus**

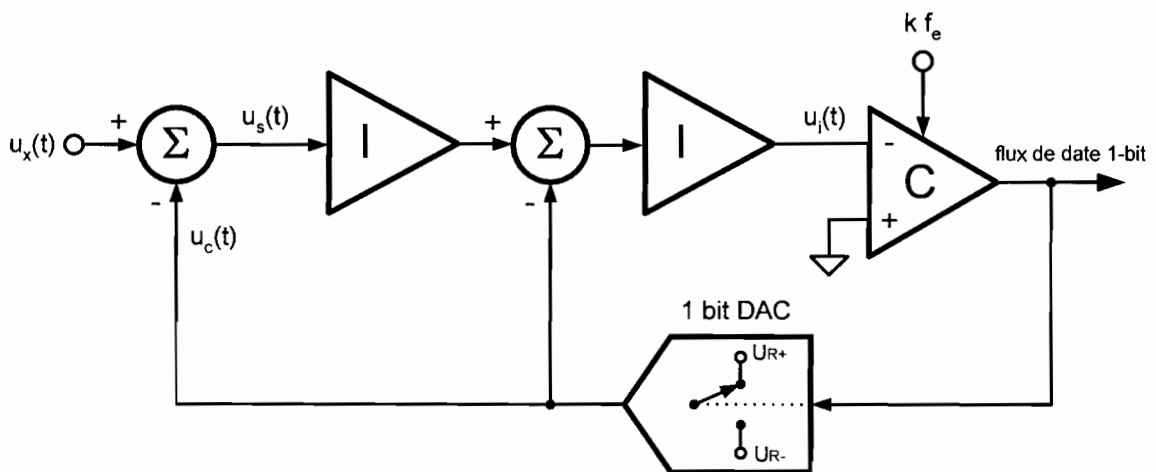
Desene:



**Fig.1** Schema de principiu a modulatorului Sigma-Delta de ordinul unu



**Fig.2** Modelul z al modulatorului Sigma-Delta de ordinul unu



**Fig.3** Schema de principiu a modulatorului Sigma-Delta de ordinul doi

### Modulator Sigma-Delta cu funcția de transfer a zgomotului de cuantizare redus

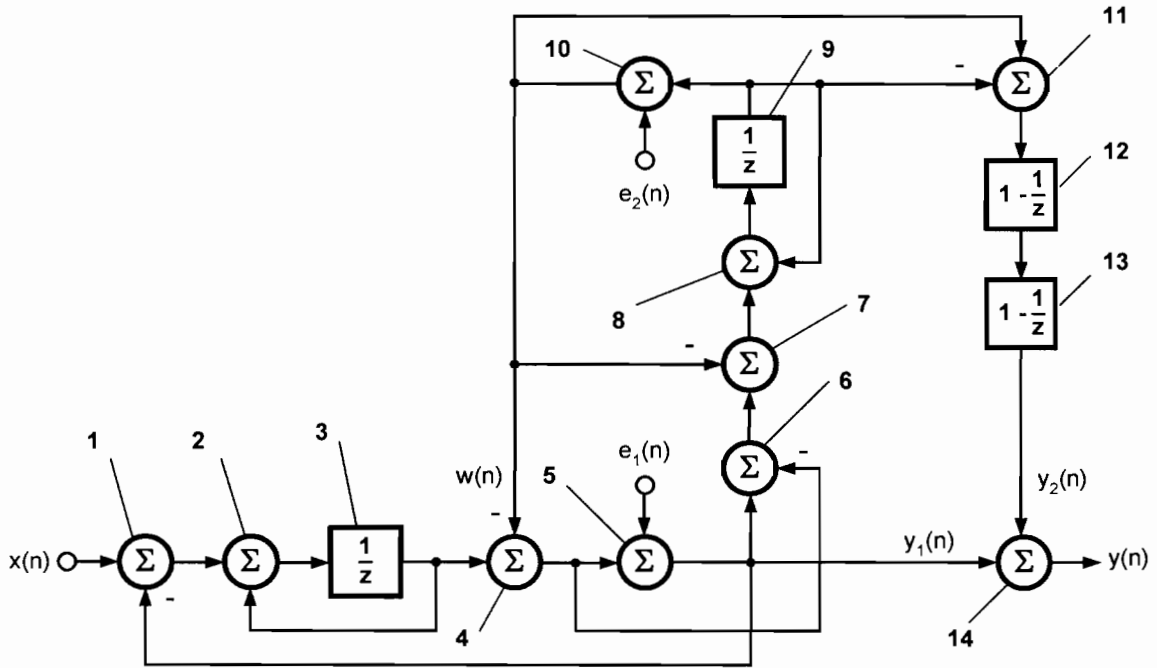


Fig. 4 Modelul z al modulatorului Sigma-Delta cu funcția de transfer a zgomotului de cuantizare redus, conform invenției