



(12)

CERERE DE BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: a 2018 00156

(22) Data de depozit: 07/03/2018

(41) Data publicării cererii:
30/08/2018 BOPI nr. 8/2018

(71) Solicitant:
• UNIVERSITATEA TEHNICĂ DIN CLUJ-
NAPOCA, STR. MEMORANDUMULUI NR. 28,
CLUJ NAPOCA, CJ, RO

(72) Inventatori:
• RUBA MIRCEA, STR. FÂNTANELE,
NR. 63-65, BL. B9, SC. 1, AP. 14,
CLUJ NAPOCA, CJ, RO

(54) **PROCEDURĂ PROGRAMABILĂ DE DETECȚIE
A DEFECTELOR LA SENZORII DE CURENT
AI UNUI CONVERTOR ELECTRONIC TRIFAZAT**

(57) Rezumat:

Invenția se referă la un procedeu de detecție a defec-telor senzorilor de curent ai unui convertor electronic trifazat. Procedeu conform invenției rulează la o frecvență de 250 de ori mai mare decât frecvența buclei de control a convertorului și efectuează etapele de: detectare a unui defect prin monitorizarea continuă a diferenței dintre valorile instantanee măsurate și valorile de referință ale curenților pe fiecare fază, comparare a diferenței menționate anterior cu o valoare de prag, iar în cazul în care diferența depășește valoarea de prag menționată, se compensează defectul apărut prin

înlocuirea valorii măsurate cu o valoare estimată a curentului pe faza pe care a apărut defectul, se modifică valorile coeficienților reguletoarelor din bucla de control și se blochează mecanismul de detecție a defectelor pe fazele rămase operaționale, pentru o perioadă de timp stabilită.

Revendicări: 1
Figuri: 3



Procedură programabilă de detecție a defectelor la senzorii de curent a unui convertor electronic trifazat

Invenția se referă la o procedură programată în procesorul de control al unui convertor electronic capabilă să detecteze, să izoleze și să compenseze defectele senzorilor de curent. Domeniul de detecție, izolare și compensare rapidă a defectelor senzorilor de curent a unui sistem electronic este tratată la momentul actual pe baza unor instrumente matematice complexe tip filtre programate în procesoarele de control. Acestea au o plajă limitată de funcționare (fie în amplitudinea curenților fie în frecvența lor fundamentală) și necesită cunoștințe avansate de matematica, inginerie și programarea procesoarelor. În aceeași măsură, modelele matematice ale acestor instrumente ocupă loc mult din memoria procesoarelor și predictibilitatea defectelor este limitată de capacitatea de stocare, viteza acestora și de plaja de operare a instrumentului matematic. Pentru evitarea acestui neajuns se propune o nouă strategie care nu se bazează pe filtre modelate matematic ci pe construcția unei proceduri precise bazată pe o serie de comparații ierarhizate corect între răspunsul instantaneu al senzorilor de curent și valoarea curenților de referință. Întreaga procedură este bazată pe funcționarea la o frecvență de calcul mult mai mare decât frecvența de comutație PWM (pulse width modulation) care implicit dictează frecvența la care funcționează bucla ce conține strategia de control a convertorului electronic. Acest aspect este foarte simplu de realizat utilizând procesoare tip FPGA (field programable gate array) care oferă posibilitatea operării pe același procesor a unor bucle care să ruleze la viteze diferite de calcul.

Se cunoaște că orice convertor electronic de putere care alimentează controlat o sarcină trifazată (de exemplu un motor sincron) este echipat cu un procesor care conține înscris în acesta strategia de control a sarcinii (de obicei control orientat după câmpul rotoric). Această strategie necesită în permanență citirea curenților de pe fiecare fază a mașinii prin intermediul senzorilor cu care acesta e echipat. În cazul în care se defectează subit (întrerupere, amplificare sau atenuare eronată) unul sau doi din acești senzori strategia de control nu mai poate funcționa și mai grav, aceasta va fi prezenta un comportament haotic al convertorului, riscând distrugerea lui sau a sarcinii pe care o alimentează. Metodele existente la momentul actual în literatura de specialitate pentru detecția defectelor se bazează pe o serie de filtre modelate matematic pentru monitorizarea curentului de la senzori. Acestea au un grad ridicat de complexitate și dificultate în implementare, pe de o parte, iar pe de altă parte, necesită procesoare cu capacitate de stocare mare pentru a găzdui întreg modelul matematic. **Problema tehnică pe care o rezolvă prezenta invenție se referă la** utilizarea procesoarelor tip FPGA, procesoare de timp-real cu tact de calcul extrem de precis și care permit implementarea unor bucle care să opereze la frecvențe de tact diferite. Profitând de aceste avantaje ale procesoarelor FPGA, se propune introducerea, pe lângă strategia de control orientat după câmpul rotoric (bucla care operează la viteza egală cu cea de comutație PWM), a unei bucle auxiliare conținând procedura de detecție, izolare și compensare a defectelor senzorilor (buclă care operează de cel puțin 250ori mai repede decât bucla de control a convertorului).

Ca atare, autorul invenției propune introducerea unei bucle de viteză mare în procesorul FPGA care să conțină o serie de comparatoare instantanee, funcționând ca

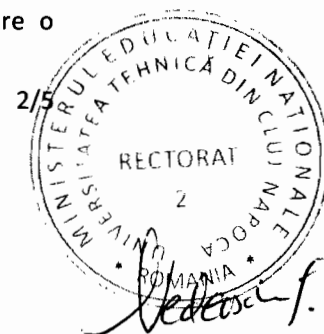


Medeose J.

observatoare a abaterii dintre curentul instantaneu măsurat de senzori și valoarea lor de referință preluată din bucla de control, reluând comparația la fiecare tact din cele 250 ale buclei. Eroarea dintre acestea este acumulată și dacă se constată o abatere mai mare decât abaterea permisă (adică apare un defect la nivelul unui senzor, fie întrerupere a lui fie amplificarea/atenuarea eronată a semnalului), procedura izolează senzorul defect iar valoarea de curent pe care acesta trebuia să o măsoare este automat înlocuită cu o valoare estimată (rezultată din valoarea de referință) și transmisă buclei de control, care rulează la o frecvență mult mai mică. Întreaga procedură (comparare, calcul eroare, detecție a defectului, izolarea și compensarea lui) se face de 250ori pe bucla de detecție defecte între două momente de calcul ale buclei de control a convertorului. Ca atare, de fiecare dată când bucla de control face un nou calcul, valoarea de curent măsurată care intră în această buclă, este fie curentul real măsurat de pe senzor dacă detectorul nu a anunțat eroare, fie este valoarea estimată în cazul în care s-a detectat defect. Indiferent de situație, bucla de control a convertorului va funcționa în continuare nefiind influențată de defectul apărut, controlând sarcina în regim normal. În cazul în care procedura de detecție anunță defect, bucla de control va iniția oprirea sarcinii, în regim normal și controlat în condiții de maximă siguranță.

Invenția se referă la construcția unei proceduri programabile de detecție, izolare și compensare a defectelor apărute la nivelul senzorilor de curent a unui convertor electronic trifazat. Soluția are ca rezultat un sistem robust și fiabil care este capabil să detecteze defectul și să ia decizia izolării și compensării lui înainte ca unitatea de control să fie perturbată de acest fenomen. Prin defect, se face referire fie la întreruperea legăturii cu senzorul, fie la amplificarea/atenuarea eronată a semnalului transmis de acesta. Conceptul se bazează pe implementarea în procesorul tip FPGA (care asigură un tact foarte precis de calcul, ales de utilizator) a buclei de control, care rulează la viteza impusă de tactul PWM, respectiv a unei bucle care conține procedura de detecție a defectului, care rulează la o viteză 250ori mai mare decât cea a buclei de control. Cu alte cuvinte, între două iterații consecutive de calcul ale buclei de control, se iterează de 250 de ori bucla de detecție, izolarea și compensarea defectului. Fizic, diferența de viteză se manifestă prin faptul că, între două tacturi ale buclei de control se execută 250 de tacturi ale buclei de detecție a defectului. Ca atare, există 250 de execuții de verificare a corectitudinii curentului măsurat, între 2 reiterări ale buclei de control (adică 2 recitiri ale curentului măsurat). Aceasta asigură robustețe, fiabilitate și siguranță în exploatarea mecanismului de detecție a defectului.

Intrările analogice pe care se măsoară răspunsul senzorilor de curent sunt citite sincron de cele două bucle (cea de control și cea de detecție defect). Însă, conform tactului fiecărei bucle, cea de control va citi o valoare pe care o va utiliza la calcule, iar până la citirea următoarei valori, bucla de detecție defecte va citi încă 249 de asemenea valori. La fiecare tact din cele 250, bucla de detecție defecte va prelua de la bucla de control valoarea de referință a curenților stabilind setul de valori care vor înlocui cele măsurate în cazul apariției defectului. La fiecare din cele 250 de tacturi, bucla de detecție defecte va compara curenții măsoarați instantaneu de la senzori cu cei de referință, stabilind eroarea dintre aceștia. Tact după tact, eroarea este acumulată. Cât timp nu apare un defect, suma erorilor se încadrează în limite normale, limite adaptate funcție de amplitudinea și frecvența fundamentală a curentului. La momentul apariției defectului (întrerupere, amplificare sau atenuare eronată) pe oricare fază, între valoarea măsurată instantaneu și valoarea de referință apare o



diferență mare, care face ca eroarea acumulată să crească dincolo de limita admisă. În această condiție, detectorul sesizează că pe acea fază a apărut defectul și automat înlocuiește valoarea reală măsurată, cu cea care era referință, devenind considerată valoare estimată. La finalul celor 250 de tacturi ale buclei de detecție defecte, când bucla de control trebuie din nou să citească indicațiile măsurate de senzori vor exista două posibilități:

-daca nu s-a semnalat eroare, noile valori de curent pentru bucla de control se vor măsura de la cei trei senzori în regim normal;

-daca s-a semnalat eroare (defect) pe un senzor, citirea canalului analogic alocat senzorului detectat defect este înlocuită cu curentul estimat. Ca atare, în loc de 3 valori măsurate, în bucla de control vor ajunge doar două măsurate și una estimată.

Tot la finalul celor 250 de tacturi, se resetează la 0 contoarele de eroare acumulată, mai puțin cel al fazei defecte, aceasta pentru a menține conștientă defecțiunea senzorului, alertând operatorul și automat pentru a proceda la decelerarea controlată până la oprire în condiții de siguranță a motorului.

Fenomenul este valabil și în cazul în care se defectează senzorii de pe două faze, fie în același interval de 250 de tacturi fie în intervale diferite. Eroarea rămâne semnalată iar curenții fazelor defecte sunt înlocuiți cu valori estimate.

În cazul defectelor, dat fiind faptul că utilizarea curenților estimați (impuși de bucla de detecție defecte) în locul celor mășurați (citiți de la senzorii reali de curent) în bucla de control se pot produce eventuale oscilații la ieșirea reguletoarelor. Astfel la finalul setului de 250 de tacturi la care s-a descoperit eroare, automat, pe lângă curentul sau curenții estimați, se transmit și alocă în bucla de control noi valori pentru coeficienții K_p și K_i ai reguletoarelor, diminuând astfel oscilațiile.

Ca atare, soluția propusă este capabilă să detecteze, izoleze și compenseze defectele senzorilor de curent cu viteză mult superioară vitezei buclei de control, fiind independentă de viteza cu care se învârtă motorul controlat, independentă de amplitudinea curenților sau de forma acestora (continuă, sinusoidală sau trapezoidală). Soluția astfel propusă are o plajă foarte largă de acoperire fiind capabilă să detecteze defecte în orice stare comportamentală a sarcinii convertorului, asigurând astfel nealterarea echipamentelor fizice sau a comportamentului acționării electrice.

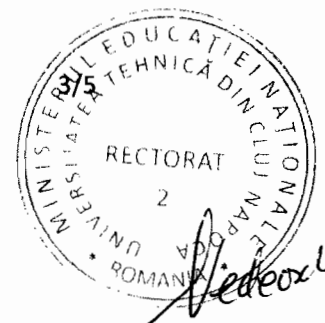
În continuare este prezentată metodologia de funcționare a procedurii programabile de detecție, izolare și compensare a defectelor senzorilor, bazat pe imaginile tip diagrame din figurile 1, 2 și 3.

Figura 1 - explicitează diferența dintre viteza cu care rulează bucla pentru unitatea de control (UC), având frecvența de tact egală cu frecvența PWM și bucla procedurii de detecție a defectului (PDD) având frecvența de tact de 250ori mai mare.

Figura 2 – detaliază toate evenimentele și legătura dintre acestea care se petrec pe fiecare din cele 250 de tacturi la nivelul buclei procedurii de detecție a defectului (PDD).

Figura 3 – exemplifică intervenția pe care bucla PDD o are în vederea detecției, izolării și compensării defectului unui senzor, prin înlocuirea citirii lui cu o valoare de curent estimată.

Se dă în continuare un exemplu de realizare a acestei invenții, ca implementare practică. Pe baza figurilor 1, 2 și 3 se va explica mecanismul de funcționare și implementare a prezentei invenții.



Conform **figurii 1**, bucla unitatea de control (UC) funcționează după tactul 2 impus de frecvența de modulație (PWM) 1. Pentru a exemplifica concret, putem considera o frecvența PWM de 20kHz. Procedura de detecție a defectelor (PDD) are tactul 3 de 250ori mai mare decât tactul 2 al unității de control. Rezultă că frecvența cu care operează mecanismul de detecție a defectului (MDD) este de 5MHz. Cele două tacturi, al UC 2 respectiv al PDD 3 sunt sincronizate, astfel, fiecare prim tact al PDD 3 din cele 250, corespunde tactului UC 2. Pe acest tact se realizează citirea curenților necesari buclei de control (UC) respectiv aceași curenți mășurați devin curenți rezidenți și pentru bucla de detecție defecte (PDD).

Pe următoarele 249 de tacturi ale buclei de detecție a defectelor se vor face citiri instantanee de curent pe fiecare tact în parte, executând în același timp și procedura de detecție a defectelor explicitată în figura 2.

Mențiune: în figura 2, de fiecare data când se utilizează simbolistica *abc* se face referire la toți cei trei curenții aferenți fazelor a, b și c; atunci când se utilizează simbolistica *a, b* sau *c* separat se face referire individuală la câte un curent a celor trei faze.

Conform **figurii 2**, pe fiecare din cele 250 de tacturi se va executa complet secvența procedurii de detecție a defectului (PDD). Altfel, are loc o *inițializare 4* în care, dacă incrementorul k, care reprezintă numărul tactului la care se află PDD are valoarea 1, adică se află la primul tact, erorile descoperite la calculele din setul anterior de 250 de tacturi sunt preluate în acest nou set. Cât timp nu s-au îndeplinit cele 250 de tacturi, valoarea k este incrementată cu +1 pe fiecare tact. Dacă se ajunge la finalul celor 250 de tacturi, incrementorul k se resetează la valoarea 0. După inițializare, pe primul tact, are loc *măsurarea curenților rezidenți* de la senzori 5 valori care vor rămâne neschimbate pentru toate restul de 249 tacturi. Pasul următor este *stabilirea curenților estimați 6* valori care defapt sunt valorile de referință instantanee ale celor trei curenți provenite din bucla de control 12. Aceste valori se restabilesc pentru fiecare tact, recitind valoarea curenților de referință. Următorul pas este *măsurarea instantanee a curenților 7* la care de pe fiecare senzor 11 se citește valoarea curentului la tactul k. Apoi, se realizează *compararea curenților estimați cu cei mășurați 8* făcând diferența acestora, stabilind astfel abaterea dintre valoarea de referință și valoarea real mășurată. Rezultatul abaterii se acumulează pe toate tacturile deja executate. *Analiza comparării – detecția defectelor 9* stabilește dacă abaterea dintre curentul estimat și cel mășurat, adică eroarea, este mai mare decât o valoare de prag permisă, test realizat pentru fiecare fază. În caz negativ variabila DEFECT este inițializată cu 0 sau în caz pozitiv, funcție de faza descoperită defectă este inițializată cu 1. *Decizia compensării defectului 10* analizează dacă au apărut defecte. Dacă constată ca nu sunt defecte, se permite buclei de control să citească în continuare curenții mășurați de pe cei trei senzori iar erorile cumulate sunt resetate la 0. Conform **figurii 2** și **figurii 3**, dacă se descoperă eroare pe oricare din cele trei faze, curentul acestei faze nu mai este mășurat de la senzori ci este înlocuit cu valoarea curentului estimat. Astfel se permite buclei de control să citească valorile doar de la senzorii constatați funcționali. Ca atare, în bucla de control vor ajunge doi curenți mășurați și al treilea estimat. Totodată, această înlocuire producând oscilații tranzitorii la nivelul buclei de control, automat se înlocuiesc și coeficienții Kp și Ki ai regulatoarelor acesteia pentru a suporta aceste oscilații. Pentru că oscilațiile apărute pot marca defecte pe fazele rămase funcționale la compararea valorii de referință cu cea mășurată, returnând defecte false, calculul erorii pe aceste faze este impus la 0 (blocat) până



la finalul celor 250 tacturi. La finalul celor 250 tacturi, valorile de curent, fie măsurate, fie estimate și măsurate (dacă există defecte) sunt transmise buclei de control (UC). La reluarea ciclului, pe următorul set de 250 tacturi, se realizează *inițializarea 1*, unde se citesc valorile erorilor din setul anterior, iar dacă a existat un senzor considerat defect, eroarea este propagată pentru a menține conștientă defecțiunea lui.

Procedura funcționează la fel și dacă apare cea de a doua eroare și din trei senzori rămâne activ doar unul singur, valoarea care trebuia să fie citită de cei defecti fiind înlocuită cu valori estimate.

Strategia prezentată de menținere în funcție a unui sistem de acționare electrică echipat cu convertor electronic alimentând o sarcină trifazată, chiar și după defectarea senzorilor de curent, implică următoarele avantaje:

- crește mult nivelul de toleranță la defecte a sistemului văzut ca entitate globală;
- asigură continuitatea funcționării normale după ce unul sau doi din cei 3 senzori s-au defectat sau măsoară valori haotice;
- este capabil să înlocuiască valorile de curent care nu mai sunt măsurate cu valori estimate;
- asigură modificarea coeficienților reguletoarelor conform defectului apărut pentru menținerea stabilității buclei de control;
- prezintă o implementare simplă fără a necesita modele matematice complexe de tip filtre sau estimatoare;
- fiabilitate ridicată, acoperind integral plaja de funcționare de cuplu și viteză ale mașinii electrice controlate din convertorul electronic;
- nu încarcă excesiv procesorul de control al convertorului electronic;
- implementare simplă bazată pe o schema logică foarte clară;
- nu necesită implicații financiare adiționale materializate prin procesoare suport extrem de costisitoare;
- nu influențează în mod negativ performanțele sistemului de acționare electrică.

În concluzie soluția tehnică oferită de noul concept de detecție a defectelor caracterizat de acuratețe, robustețe, fiabilitate, siguranță și simplitate fără costuri financiare adiționale permițând continuitate în exploatarea sistemului electromecanic alimentat din convertorul electronic cu senzori defecti.



Revendicări:

1. Procedură de detecție a defectelor la senzorii de curent a unui convertor electronic, **caracterizată prin aceea că** operează la o frecvență de tact (3) de 250 ori mai mare decât frecvența buclei de control (2), este capabilă să detecteze defecte apărute la nivelul senzorilor înainte ca influența lor să afecteze negativ bucla de control urmând următoarele etape:

- detecția defectului prin monitorizarea continuă (8) a diferenței dintre valorile instantanee măsurate și cele instantanee de referință.
- decide apariția (9) defectului prin compararea diferenței dintre valorile instantanee măsurate și cele instantanee de referință (8) cu un prag adaptiv funcție de amplitudinea de referință a curenților și frecvența lor fundamentală.
- o decizie (10) privind faza pe care a apărut defectul și intervenția pe care trebuie să o aplice pentru compensarea lui.
- compensează defectul apărut la oricare dintre cele trei faze, prin înlocuirea (10) curentului măsurat cu valoarea estimată a acestuia.
- elimină dezechilibrele naturale care apar la înlocuirea curentului măsurat cu valoarea lui estimată, prin impunerea noilor valori (10) pentru coeficienții reguletoarelor din bucla de control.
- elimină erorile false care pot fi detectate la dezechilibrele tranzitorii naturale care apar la înlocuirea curentului măsurat cu valoarea lui estimată, prin blocarea (10) a mecanismului de detecție a defectelor pe fazele rămase operaționale pentru o perioadă stabilită.
- este aplicabilă pentru sisteme trifazate sinusoidale, trapezoidale sau sisteme de alimentare în curent continuu, principiul rămânând identic.



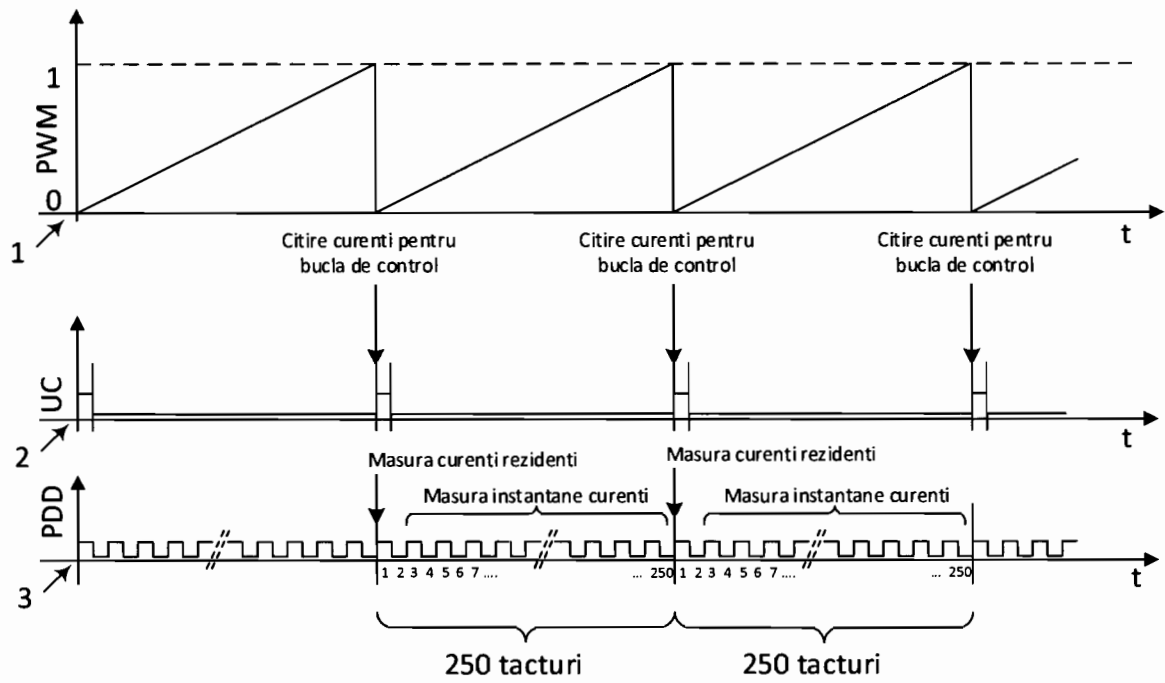


Fig.1 Explicativă privind diferența dintre frecvențele de tact ale buclei de control și cea de detecție defecte



Redona J.

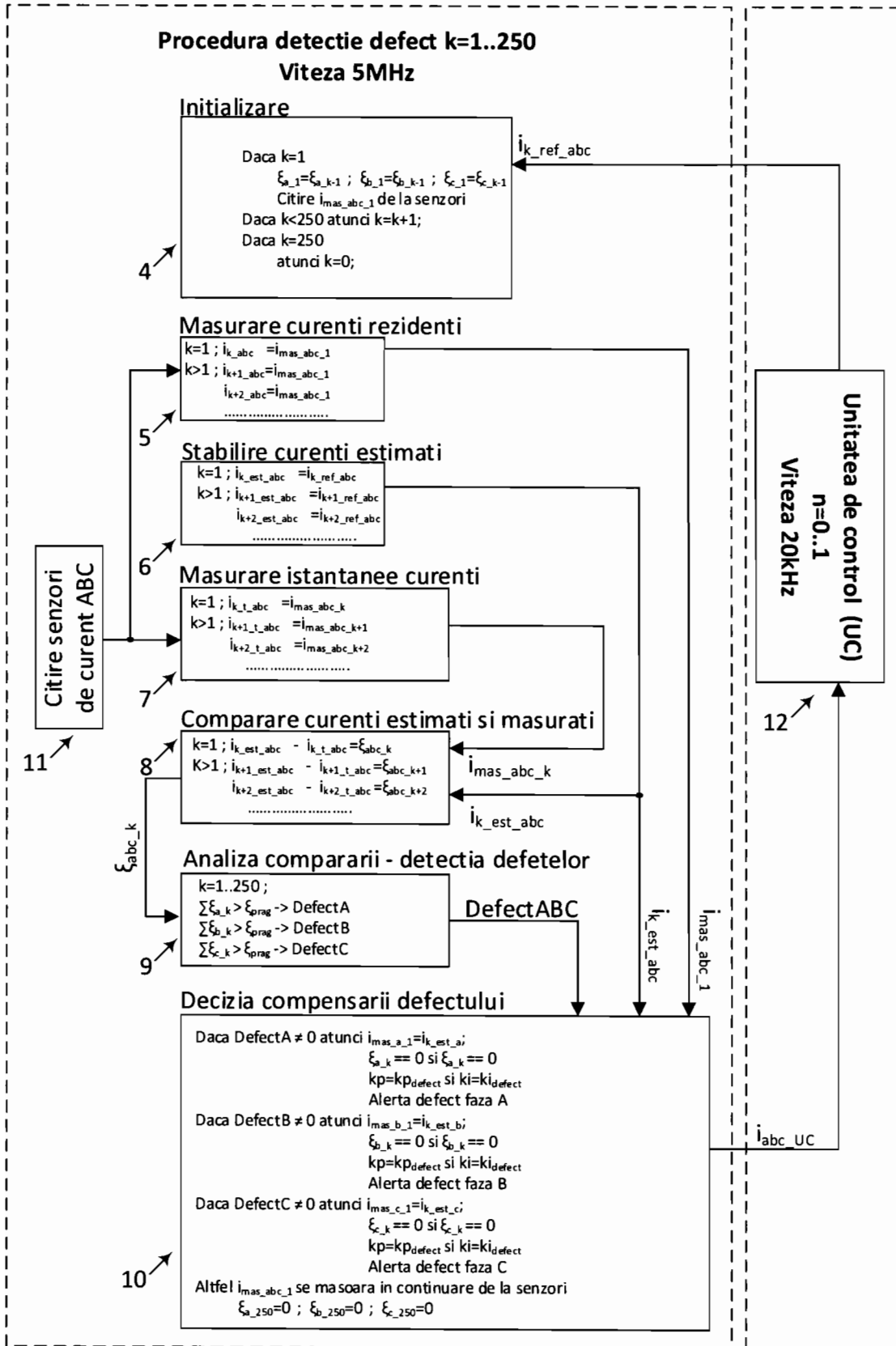


Fig.2 Diagramă blog cu secvențele de calcul ale buclei de detecție defecte



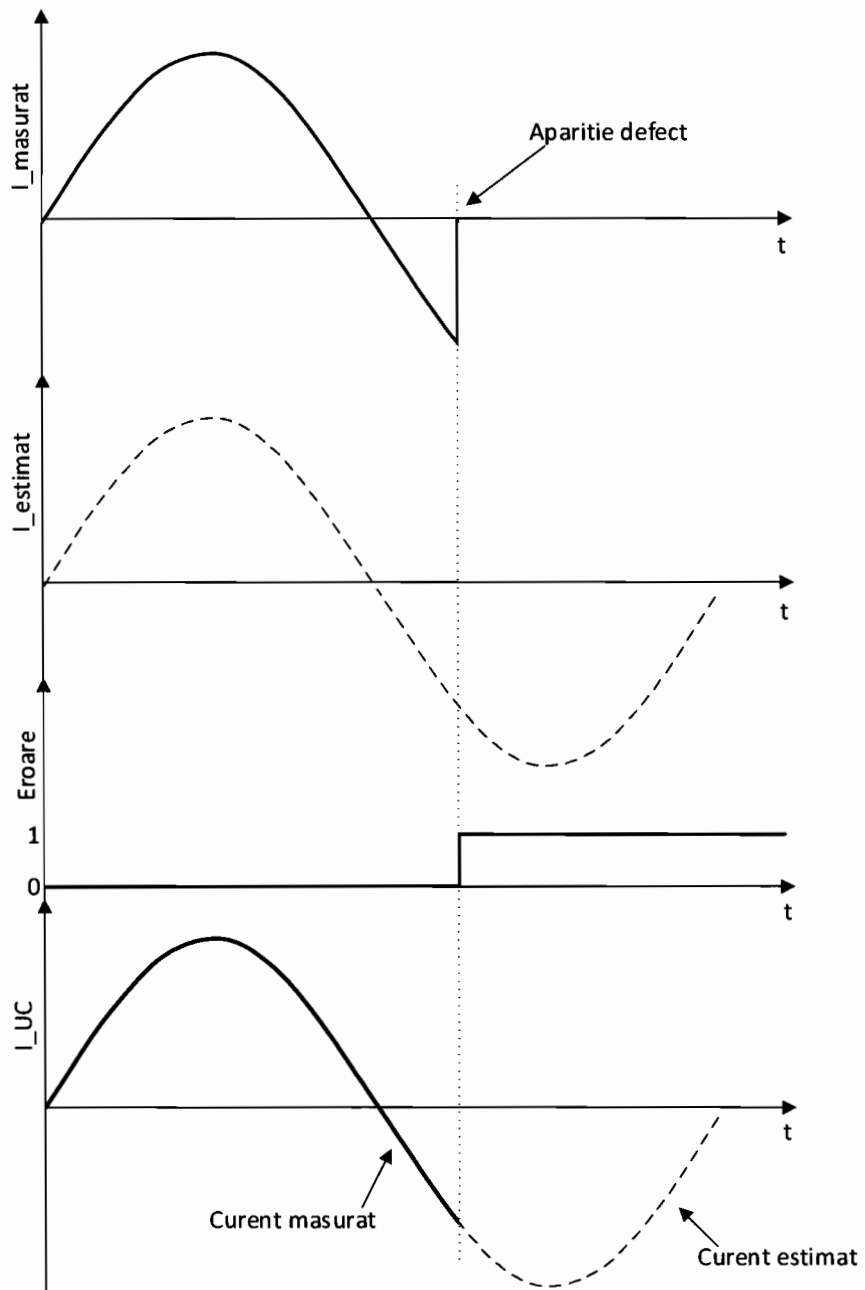


Fig.3 Exemplu la intervenția buclei PDD pentru detecția, izolarea și compensarea defectului unui senzor



[Handwritten signature]