



(12)

BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: **a 2018 00156**

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

(45) Data publicării mențiunii acordării brevetului: **30/12/2020** BOPI nr. **12/2020**

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

(73) Titular:
• **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**

(56) Documente din stadiul tehnicii:
**KR20120048877A; "On fault tolerance
increase of switched reluctance
machines", Conferința EUROCON 2009,
locație St. Petersburg, Rusia, data 18-23
mai 2009 (Lorand SZABO și Mircea
RUBA); JP2008022645A**

(54) **PROCEDEU DE DETECTIE A DEFECTELOR SENZORILOR
DE CURENT AI UNUI CONVECTOR ELECTRONIC TRIFAZAT**



RO 132781 B1

1 Invenția se referă la un procedeu de detecție a defectelor senzorilor de curent a unui
2 convertor electronic capabil să detecteze, să izoleze și să compenseze defectele senzorilor de
3 curent.

4 Domeniul de detecție, izolare și compensare rapidă a defectelor senzorilor de curent a
5 unui sistem electronic este tratată la momentul actual pe baza unor instrumente matematice
6 complexe tip filtre programate în procesoarele de control. Acestea au o plajă limitată de func-
7 ționare (fie în amplitudinea curenților fie în frecvența lor fundamentală) și necesită cunoștințe
8 avansate de matematică, inginerie și programarea procesoarelor. În aceeași măsură, modelele
9 matematice ale acestor instrumente ocupă loc mult din memoria procesoarelor și predic-
10 tibilitatea defectelor este limitată de capacitatea de stocare, viteza acestora și de plaja de
11 operare a instrumentului matematic. Se cunoaște ca orice convertor electronic de putere care
12 alimentează controlat o sarcină trifazată (de exemplu un motor sincron) este echipat cu un
13 procesor care conține înscris în acesta strategia de control a sarcinii (de obicei control orientat
14 după câmpul rotoric). Această strategie necesită în permanență citirea curenților de pe fiecare
15 fază a mașinii prin intermediul senzorilor cu care acesta e echipat. În cazul în care se defec-
16 tează subit (întrerupere, amplificare sau atenuare eronată) unul sau doi din acești senzori stra-
17 tegia de control nu mai poate funcționa și mai grav, aceasta va fi prezentă un comportament
18 haotic al convertorului, riscând distrugerea lui sau a sarcinii pe care o alimentează. Metodele
19 existente la momentul actual în literatura de specialitate pentru detecția defectelor se bazează
20 pe o serie de filtre modelate matematic pentru monitorizarea curentului de la senzori. Acestea
21 au un grad ridicat de complexitate și dificultate în implementare, pe de o parte, iar pe de altă
22 parte, necesită procesoare cu capacitate de stocare mare pentru a găzdui întreg modelul
23 matematic.

24 Pentru evitarea acestor neajunsuri se propune un procedeu cu o nouă strategie care nu
25 se bazează pe filtre modelate matematic ci pe construcția unei proceduri precise bazată pe o
26 serie de comparații ierarhizate corect între răspunsul instantaneu al senzorilor de curent și
27 valoarea curenților de referință. Întregul procedeu este bazat pe funcționarea la o frecvență de
28 calcul mult mai mare decât frecvența de comutație PWM (pulse width modulation) care implicit
29 dictează frecvența la care funcționează bucla ce conține strategia de control a convertorului
30 electronic. Acest aspect este foarte simplu de realizat utilizând procesoare tip FPGA (field
31 programable gate array) care oferă posibilitatea operării pe același procesor a unor bucle care
32 să ruleze la viteze diferite de calcul.

33 Problema tehnică pe care o rezolvă prezenta invenție constă în detecția defectelor unor
34 senzori de curent cu menținerea funcționării după defect în cadrul convertoarelor electronice
35 trifazate.

36 Soluția de față prevede utilizarea procesoarelor tip FPGA, procesoare de timp-real cu
37 tact de calcul extrem de precis și care permit implementarea unor bucle care să opereze la
38 frecvențe de tact diferite.

39 Profitând de aceste avantaje ale procesoarelor FPGA, se propune introducerea, pe
40 lângă strategia de control orientat după câmpul rotoric (bucla care operează la viteza egală cu
41 cea de comutație PWM), a unei bucle auxiliare continuând procedura de detecție, izolare și com-
42 pensare a defectelor senzorilor (bucla care operează de cel puțin 250 de ori mai repede decât
43 bucla de control a convertorului).

44 Ca atare, autorul invenției propune introducerea unei bucle de viteză mare în procesorul
45 FPGA care să conțină o serie de comparatoare instantanee, funcționând observatoare a abaterii
46 dintre curentul instantaneu măsurat de senzori și valoarea lor de referință preluată din bucla de
47 control, reluând comparația la fiecare tact din cele 250 al buclei. Eroarea dintre acestea este
48 acumulată și dacă se constată o abatere mai mare decât abaterea permisă (adică apare un

RO 132781 B1

defect la nivelul unui senzor, fie întrerupere a lui fie amplificare/atenuare eronată a semnalului), 1
procedura izolează senzorul defect iar valoarea de curent pe care acesta trebuia să o măsoare 3
este automat înlocuită cu o valoare estimată (rezultată din valoarea de referință) și transmisă 3
buclei de control, care rulează la o frecvență mult mai mică. Întreaga procedură (comparare, 5
calcul eroare, detecție a defectului, izolarea și compensarea lui) se face de 250 de ori pe bucla 5
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 7
măsurată care intră în această buclă, este fie curentul real măsurat de pe senzor dacă detec- 7
torul nu a anunțat eroare, fie este valoarea estimată în cazul în care s-a detectat defect. Indi- 9
ferent de situație, bucla de control a convertorului va funcționa în continuare nefiind influențată 9
de defectul apărut, controlând sarcina în regim normal. În cazul în care procedura de detecție 11
anunță defect, bucla de control va iniția oprirea sarcinii, în regim normal și controlat în condiții 11
de maximă siguranță. 13

Procedeu de detecție a defectelor senzorilor de curent a unui convertor electronic, con- 15
form invenției, operează la o frecvență de tact de 250 ori mai mare decât frecvența buclei de 15
control, care detectează defectele apărute la nivelul senzorilor înainte ca influența lor să 17
afecteze negativ bucla de control și constă în parcurgerea următoarelor etape: 17

- detectarea defectului prin monitorizarea continuă a diferenței dintre valorile instantanee 19
măsurate și cele instantanee de referință; 19

- compararea diferenței dintre valorile instantanee măsurate și cele instantanee de 21
referință cu un prag adaptiv funcție de amplitudinea de referință a curenților și frecvența lor 21
fundamentală;

- determinarea fazei pe care a apărut defectul și intervenția pe care trebuie să o aplice 23
pentru compensarea lui;

- compensarea defectul apărut la oricare dintre cele trei faze, prin înlocuirea valorii 25
curentului măsurat cu valoarea estimată a acestuia;

- eliminarea dezechilibrelor naturale care apar la înlocuirea valorii curentului măsurat cu 27
valoarea lui estimată, prin impunerea noilor valori pentru coeficienții reguletoarelor din bucla de 29
control; și

- eliminarea erorilor false care pot fi detectate la dezechilibrele tranzitorii naturale care 31
apar la înlocuirea valorii curentului măsurat cu valoarea lui estimată, prin blocarea mecanismului 31
de detecție a defectelor pe fazele rămase operaționale pentru o perioadă stabilită.

Procedeu prezentat, de menținere în funcție a unui sistem de acționare electrică echipat 33
cu convertor electronic alimentând o sarcină trifazată, chiar și după defectarea senzorilor de 35
curent, implică următoarele avantaje: 35

- 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 37
defectat sau măsoara valori haotice;

- este capabil să înlocuiască valorile de curent care nu mai sunt măsurate cu valori 39
estimate;

- asigură modificarea coeficienților reguletoarelor conform defectului apărut pentru 41
menținerea stabilității buclei de control;

- prezintă o implementare simplă fără a necesita modele matematice complexe de tip 43
filtre sau estimatoare;

- fiabilitate ridicată, acoperind integral plaja de funcționare de cuplu și viteza ale mașinii 45
electrice controlate din convertorul electronic;

- nu încarcă excesiv procesorul de control al convertorului electronic; 47

- implementare simplă bazată pe o schemă logică foarte clară;

RO 132781 B1

1 - nu necesită implicații financiare adiționale materializate prin procesoare suport extrem
de costisitoare;

3 - nu influențează în mod negativ performanțele sistemului de acționare electrică.

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

În continuare este prezentată metodologia de funcționare a procedurii de detecție a
9 defectelor senzorilor de curent a unui convertor electronic, bazat pe imaginile tip diagrame din
figurile 1, 2 și 3 care reprezintă:

11 Fig. 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
13 a defectului (PDD) având frecvența de tact de 250 de ori mai mare;

15 Fig. 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);

17 Fig. 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.

Invenția se referă la construcția unui procedeu programabil de detecție, izolare și
19 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
21 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
23 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
25 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 de 250 de ori mai
27 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
29 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
31 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
33 exploatarea mecanismului de detecție a defectului.

Intrările analogice pe care se măsoară răspunsul senzorilor de curent sunt citite sincron
35 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
37 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
39 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 măsurați
41 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 nor-
43 male, limite adaptate funcție de amplitudinea și frecvența fundamentală a curentului. La momen-
tul apariției defectului (întrerupere, amplificare sau atenuare eronată) pe oricare fază, între
45 valoarea măsurată instantaneu și valoarea de referință apare diferență mare, care face ca eroa-
rea acumulată să crească dincolo de limita admisă. În această condiție, detectorul sesizează
47 că pe acea fază a apărut defectul și automat înlocuiește valoarea reală măsurată, cu cea care

RO 132781 B1

era referința, 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: 1
3

- dacă nu s-a semnalat eroare, noile valori de curent pentru bucla de control se vor măsura de la cei trei senzori în regim normal; 5

- dacă s-a semnalat eroare (defect) pe un senzor, citirea canalului analogic alocat senzorului detectat defect este înlocuită cu curentul estimat. 7

Ca atare, în loc de 3 valori măsurate, în bucla de control vor ajunge doar două măsurate și una estimată. 9

Tot la finalul celor 250 de tacturi, se resetează la 0 contoarele de eroare acumulate, 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. 11
13

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. 15

În cazul defectelor, dat fiind faptul că utilizarea curenților estimați (impuși de bucla de detecție defecte) în locul celor mășurați (cititi 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. 17
19
21

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). 23
25

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. 27
29

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. 31

Conform fig. 1, bucla unitatea de control (UC) funcționează după tactul 2 impus de frecvența de modulație (PWM) 1. Pentru a exemplifica concret, putem considera o frecvență PWM de 20kHz. 33
35

Procedura de detecție a defectelor (PDD) are tactul 3 de 250 de ori 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 aceeași curenți mășurați devin curenți rezidenți și pentru bucla de detecție defecte (PDD). 37
39
41

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 fig. 2. 43

Mențiune: în fig. 2, de fiecare dată 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. 45
47

RO 132781 B1

1 Conform fig. 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 incre-
3 mentorul 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
5 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 rese-
7 tează 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 urmă-
9 tor 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
11 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
13 realizează compararea curenților estimați cu cei mășurați **8** făcând diferența acestora, stabilind
astfel abaterea dintre valoarea de referință și valoarea real măsurată.

15 Rezultatul abaterii se acumulează pe toate tacturile deja executate. Analiza comparării
- detecția defectelor **9** stabilește dacă abaterea dintre curentul estimat și cel măsurat, adică
17 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
19 defectă este inițializată cu **1**. Decizia compensării defectului **10** analizează dacă au apărut
defecte. Dacă constată că nu sunt defecte, se permite buclei de control să citească în con-
21 tinuare curenții mășurați de pe cei trei senzori iar erorile cumulate sunt resetate la 0. Conform
fig. 2 și fig. 3, dacă se descoperă eroare pe oricare din cele trei faze, curentul acestei faze nu
23 mai este măsurat 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
25 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 K_p
27 și K_i ai reguletoarelor acestora pentru a suporta aceste oscilații. Pentru ca oscilațiile apărute pot
marca defecte pe fazele rămase funcționale la compararea valorii de referință cu cea măsurată,
29 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
31 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 citește valorile erorilor din setul
33 anterior, iar dacă a existat un senzor considerat defect, eroarea este propagată pentru a
menține conștientă defecțiunea lui.

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

RO 132781 B1

Revendicare

1

Procedeu de detecție a defectelor senzorilor de curent a unui convertor electronic, **caracterizat prin aceea că**, operează la o frecvență de tact **(3)** de 250 ori mai mare decât frecvența buclei de control **(2)**, care detectează defectele apărute la nivelul senzorilor înainte ca influența lor să afecteze negativ bucla de control și constă în parcurgerea următoarelor etape:

- detectarea defectului **(9)** prin monitorizarea continuă a diferenței dintre valorile instantanee măsurate și cele instantanee de referință;

- compararea diferenței **(8)** dintre valorile instantanee măsurate și cele instantanee de referință cu un prag adaptiv funcție de amplitudinea de referință a curenților și frecvența lor fundamentală;

- determinarea fazei pe care a apărut defectul și intervenția pe care trebuie să o aplice pentru compensarea lui;

- compensarea defectul **(10)** apărut la oricare dintre cele trei faze, prin înlocuirea valorii curentului măsurat cu valoarea estimată a acestuia;

- eliminarea dezechilibrelor naturale care apar la înlocuirea valorii curentului măsurat cu valoarea lui estimată, prin impunerea noilor valori pentru coeficienții reguletoarelor din bucla de control; și

- eliminarea erorilor false care pot fi detectate la dezechilibrele tranzitorii naturale care apar la înlocuirea valorii curentului măsurat cu valoarea lui estimată, prin blocarea **(10)** a mecanismului de detecție a defectelor pe fazele rămase operaționale pentru o perioadă stabilită.

(51) Int.Cl.

H02P 29/028 (2016.01);

H02M 7/44 (2006.01);

G01R 19/165 (2006.01)

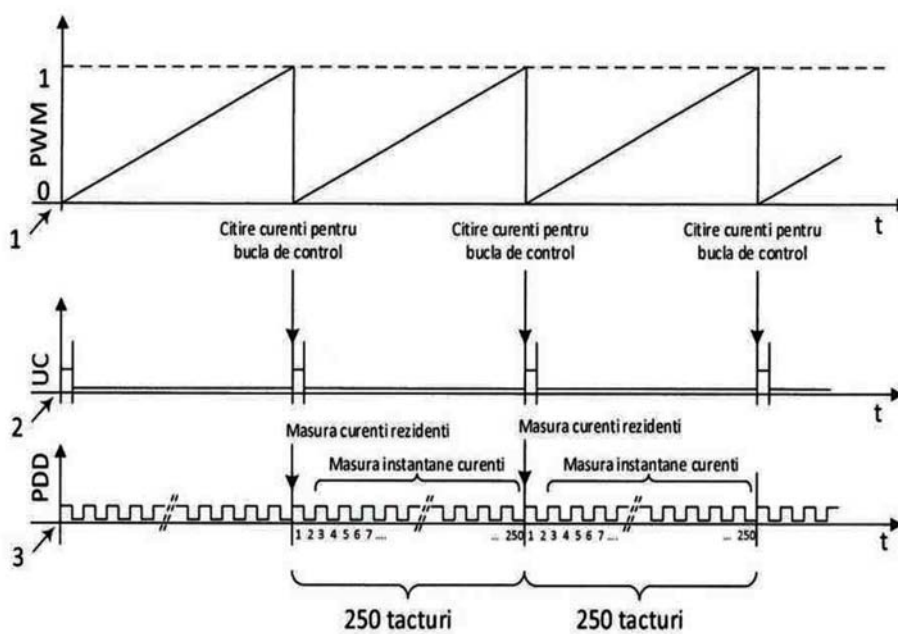


Fig. 1

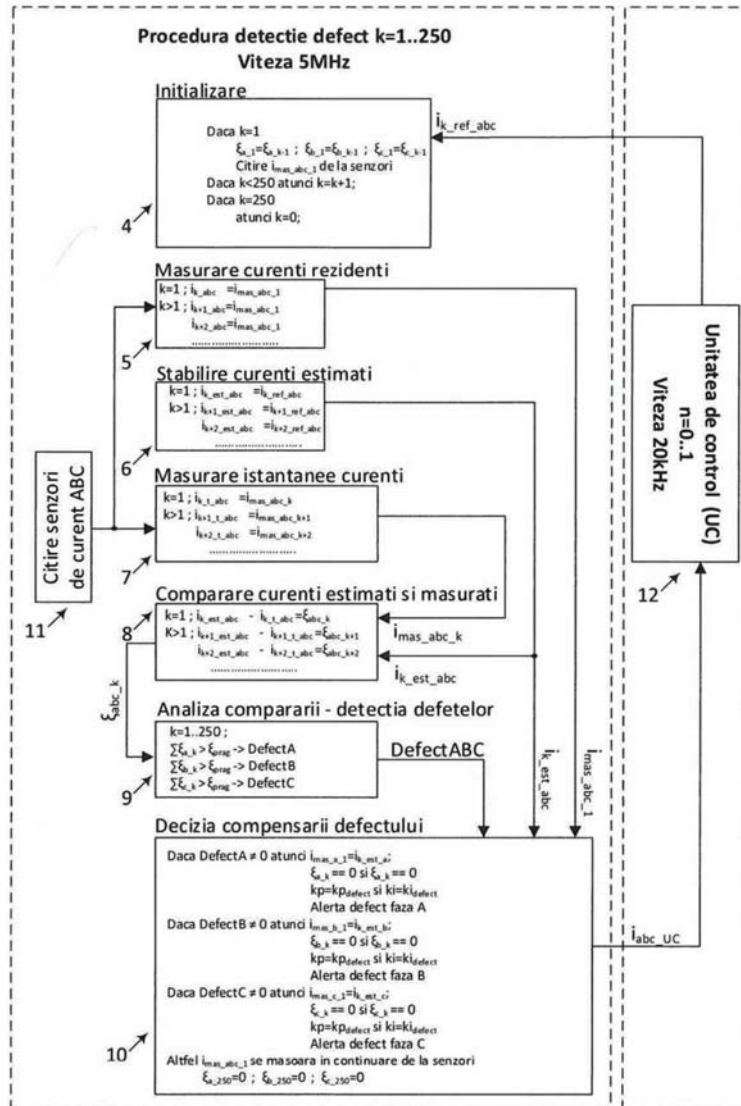


Fig. 2

(51) Int.Cl.

H02P 29/028 (2016.01);

H02M 7/44 (2006.01);

G01R 19/165 (2006.01)

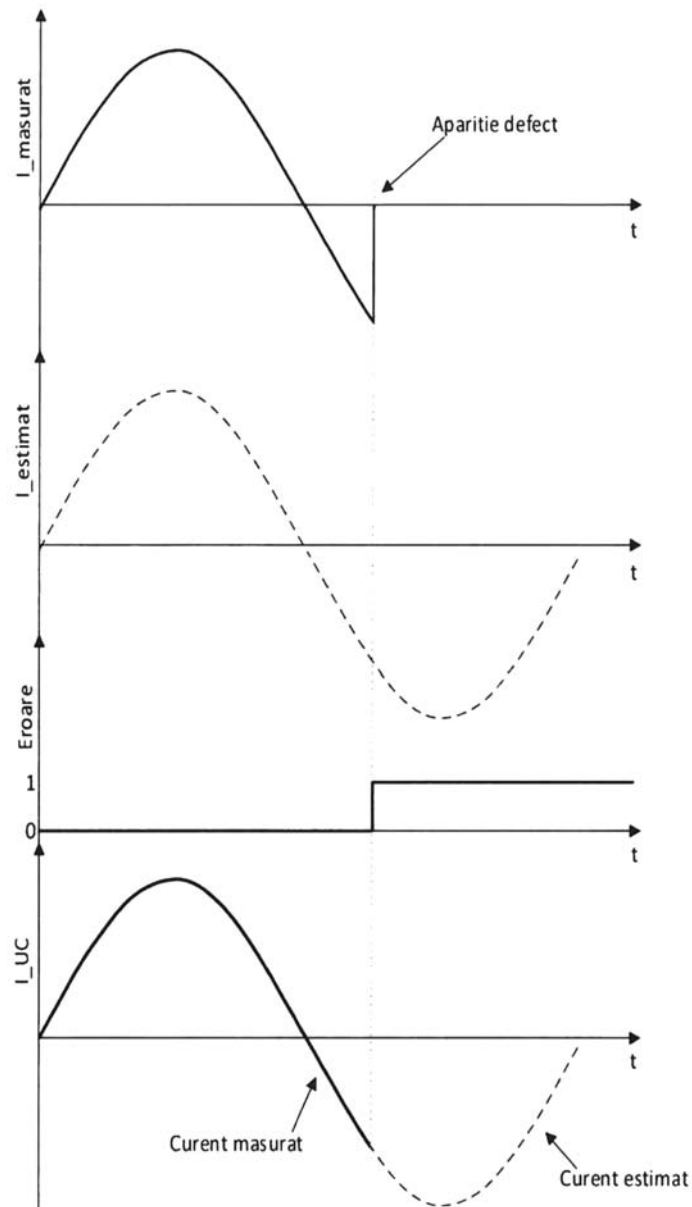


Fig. 3



Editare și tehnoredactare computerizată - OSIM
Tipărit la Oficiul de Stat pentru Invenții și Mărci
sub comanda nr. 539/2020