



(12) CERERE DE BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: a 2015 00843

(22) Data de depozit: 16/11/2015

(41) Data publicării cererii:  
30/05/2016 BOPI nr. 5/2016

(71) Solicitant:  
• INSTITUTUL NAȚIONAL DE  
CERCETARE-DEZVOLTARE  
AEROSPAȚIALĂ "ELIE CARAFOLI" -  
INCAS, BD.IULIU MANIU NR.220,  
SECTOR 6, BUCUREȘTI, B, RO

(72) Inventatori:  
• ENCIU DANIELA, STR. TOPILELE NR. 3,  
COMUNA CURCANI, CL, RO;  
• URSU IOAN, STR.LIVIU REBREANU  
NR.20, BL.A 6, SC.4, ET.3, AP.45,  
SECTOR 3, BUCUREȘTI, B, RO;  
• TUDOSE MIHAI,  
STR. HORIA MACELARIU NR. 29-31,  
BL. XI/3, AP. 4, SECTOR 1, BUCUREȘTI, B,  
RO

(54) PROCEDEU COMPLEX DE IDENTIFICARE ONLINE A  
DEFECTELOR MECANICE ÎN SPECTROSCOPIA  
IMPEDANȚEI ELECTROMECHANICE CU EVITAREA  
DIAGNOZELOR FALSE

(57) Rezumat:

Invenția se referă la un sistem și la o metodă de identificare a defectelor de origine mecanică în structuri metalice sau compozite. Sistemul conform invenției cuprinde un bloc structural format din structură monitorizată și un număr de senzori piezo-activi, distribuiți cu o rază de acțiune prestabilită, un bloc de achiziție format dintr-un multiplexor analogic programabil, care cuplează succesiv senzorii activi la intrarea unui analizor de impedanță electromecanică din cadrul blocului de achiziție, un bloc software și alarmare, format dintr-o unitate de calcul și un bloc de afișare/alarmare, unitatea de calcul primind date ( $\text{Re } Z(\omega)$ ) de la analizorul de impedanță electromecanică, în vederea procesării și stabilirii dacă numărul vârfurilor de rezonanță pe datele ( $\text{Re } Z(\omega)$ ), într-o bandă de frecvențe dată, crește față de numărul inițial, determinat în condiții de referință.

Revendicări: 4  
Figuri: 7

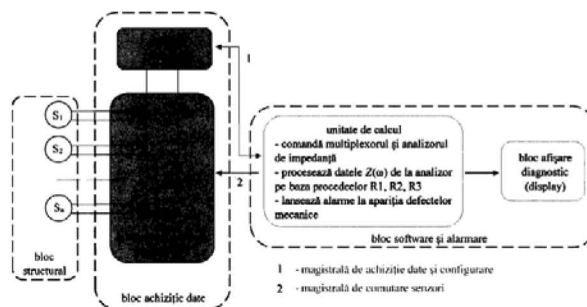


Fig. 7



## PROCEDEU COMPLEX DE IDENTIFICARE ONLINE A DEFECTELOR MECANICE ÎN SPECTROSCOPIA IMPEDANȚEI ELECTROMECHANICE, CU EVITAREA DIAGNOZELOR FALSE

### DESCRIEREA INVENȚIEI

Invenția de față se referă la un procedeu complex de identificare a defectelor, de origine mecanică, în structuri metalice sau compozite, în principal aerospațiale și spațiale, dar și în structuri de altă natură: clădiri, poduri, centrale energetice etc. Metoda utilizată, nedistructivă și ușor de implementat, este aceea a **spectroscopiei impedanței electromecanice (SIEM)**, propusă în lucrarea de pionierat *Liang, C.; Sun, F. P.; Rogers, C. A., Coupled electro-mechanical analysis of adaptive material system – determination of the actuator power consumption and system energy transfer, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 5, 1994, pp. 12-20*. Metoda constă în utilizarea unor senzori activi piezoelectrice, subțiri și ieftini, distribuiți în structura monitorizată, capabili să genereze unde elastice dirijate (unde Lamb), pentru identificarea defecțiunilor structurilor încă din faza incipientă. Aceste unde, numite și unde de placă (“plate waves”), sunt dirijate în sensul că se propagă, cu pierderi mici de energie, în plăcile solide, fiind astfel proprii pentru investigarea suprafețelor acestora până la o adâncime (grosime) compatibilă cu lungimea de undă. Viteza de propagare depinde de caracteristicile materialului: modulul lui Young, coeficientul Poisson, densitate (*Rugina, C., Toader, A., Giurgiutiu, V., Ursu, I., The electromechanical impedance method for structural health monitoring of thin circular plates, Proceedings of the Romanian Academy, Series A, Mathematics, Physics, Technical Sciences, Information Sciences, 2014, vol. 15, no. 3, pp. 272–282*), dar și de frecvența generată. Lungimea de undă a vibrațiilor este dată de raportul dintre viteza de propagare și frecvență. Astfel, pentru o placă subțire de aluminiu, viteza undelor longitudinale este 6320 m/s. Pentru frecvența de 2 MHz, lungimea de undă este de aprox 3 mm. La frecvențe de ordinul GHz-ilor, lungimea de undă este de ordinul  $\mu\text{m}$ -ilor, comparabilă cu dimensiunea defectelor incipiente. La asemenea dimensiuni, metodele convenționale nu sunt eficiente.

În continuare, se prezintă pe scurt principiul metodei SIEM. Senzorii activi piezoelectrice au forma unor plasturi (“patches”, “wafers”) de material piezoelectric, subțiri de ordinul zecimilor de milimetru, și se lipesc cu adezivi specifici pe suprafața ce urmează a fi monitorizată. Are loc astfel o interacțiune între rigiditatea mecanică a structurii monitorizate și rigiditatea mecanică a senzorului activ. Metoda SIEM constă în utilizarea spectrului impedanței electromecanice complexe rezultate  $Z(\omega)$  a senzorului activ piezo, numită și “semnătură” a structurii, ca indicator al sănătății acesteia. Spectrul de impedanță electromecanică se măsoară cu un aparat dedicat, numit analizor de impedanță (sau cu alte tehnici de cost redus), în regim dinamic de frecvență unghiulară  $\omega$ , ca raport între

tensiunea de excitație aplicată  $V(t) := V_0 \sin(\omega t)$  [V] și curentul de răspuns  $I(t) := I \sin(\omega t + \varphi)$  [A] generat ca efect piezoelectric (**Figura 1**);  $\varphi$  este defazajul. Plecând de la lucrarea lui Liang ș. a., acest raport, numit impedanța electromecanică, este o spectrogramă complexă (justificând astfel acronimul SIEM) și are expresia

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} = \frac{1}{i\omega C} \left( 1 - k_{31}^2 \frac{K_s(\omega)}{K_s(\omega) + K_p(\omega)} \right)^{-1} \quad (1)$$

$K_s(\omega)$  este rigiditatea complexă a structurii monitorizate,  $K_p(\omega)$  este rigiditatea complexă a senzorului,  $C$  este capacitatea electrică a senzorului,  $k_{31}$  este factorul de cuplaj electromecanic,  $i$  este unitatea imaginară. Partea reală a spectrului,  $\text{Re } Z(\omega)$ , este sensibilă, în zona frecvențelor mari, de ordinul GHz-ilor, la variații structurale foarte mici, de ordinul micronilor, nivel la care se situează defectele incipiente (Sun, F. P., Chaudhry, Z., Liang, C., and Rogers, C. A. (1995), "Truss structure integrity identification using PZT sensor-actuator," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 6, 1995, pp. 134–139). În funcție de mărimea defectului, benzi de frecvențe de ordin mai redus pot fi relevante. La nivelul defectelor de ordinul mm-ilor, devin relevante benzi de frecvențe de ordinul kHz-ilor.

Tehnica de identificare a defectelor bazată pe SIEM prezintă avantaje, în raport cu oricare altă metodă defectoscopică, întrucât poate fi implementată în timp real și online pe un sistem de monitorizare a stării de sănătate a structurilor (SMSS). Acest sistem constă în (a) monitorizarea în timp a sistemului prin citirea periodică a informației dată de senzori, (b) evidențierea comportamentului de tip „defect” și (c) analiza statistică a datelor în vederea evaluării periodice a stării structurii în sensul capabilității acesteia de a realiza funcționalitatea operațională. Beneficiile unui astfel de sistem se traduc în proiectarea de structuri inteligente, implicând printre altele managementul prognozei duratei de viață și reducerea costurilor de mentenanță. La nivelul unei țări ca Marea Britanie, aceste costuri se ridicau în anul 2000 la astronomica sumă de **27 miliarde de lire sterline** (Ursu, I., Giurgiutiu, V., Toader, A. *Towards spacecraft applications of structural health monitoring*, *INCAS Bulletin*, vol. 4, no. 4, 2012, pp. 111-124). Implementarea experimentală a tehnicii de monitorizare bazată pe impedanță este deja utilizată cu succes în mai multe sisteme complexe: infrastructuri civile, sisteme energetice, sisteme aerospațiale și spațiale (*Proceedings of the 5<sup>th</sup> European Workshop on Structural Health Monitoring, Sorrento, Naples, Italy, June 28-July 4, 2010*, Eds. F. Casciati and M. Giordano).

Problema pusă spre rezolvare într-un proiect recent (proiectul STAR Space SHM ID 188, finanțat de la buget prin Agenția Spațială Română) este aceea a validării metodei SIEM în condiții extreme ale vehiculelor evoluând în spațiul extraterestru. Acestea sunt, în principal, variațiile mari

16-11-2015

de temperatură și expunerea la radiații cosmice. În acest cadru, s-a desfășurat un program complex de încercări în care un specimen reprezentativ, un disc de aluminiu A2024 cu diametrul de 100 mm și grosime de 0.8 mm, a fost fabricat într-un număr mare de exemplare, din rațiuni statistice. Pe disc, în centru, s-a lipit cu un adeziv epoxy M-Bond 610 Vishay un senzor activ STEMINC SMD07T02S412WL. S-a realizat astfel specimenul de probă pentru ridicarea, într-o prima etapă, la temperatura camerei, a semnăturilor SIEM,  $Re Z(\omega)$ . Procedura urmată este ilustrată în **Figura 2**. Se observă că metoda este consistentă: într-o bandă largă de frecvențe (10 – 500) kHz, semnăturile  $Re Z(\omega)$  se suprapun practic pentru toate cele 10 discuri considerate. Se menționează că sunt simultan prezente frecvențele naturale ale modurilor de incovoiere și axial-simetrice. Discurile au fost apoi prelucrate cu o mașină de prelucrare, cu tehnica laser, pentru simularea unor fisuri cu lățimea de 0.15 mm și lungimea de 10 mm, de geometrii (arce de cerc sau segmente) și locații diferite: la 7, 15, 25, respectiv, 45 mm de centrul discului. Influența acestor defecte a fost măsurată, la temperatura camerei, prin metoda SIEM. Rezultatele au fost coerente și un exemplu reprezentativ este dat în **Figura 3**.

Fenomenul reprezentat pe **Figura 3** poate fi explicat, în termenii modificărilor structurale produse de un defect, apelând la conceptul de **impedanță mecanică**. Aceasta este o măsură a rezistenței la mișcare a structurii în prezența unei forțe armonice; dimensional, impedanța mecanică este un raport între forță și viteză. În relația (1), implicarea impedanțelor mecanice ale structurii și elementului piezo este echivalentă, printr-o simplificare de operator diferențial  $d/dt$ , cu aceea a **rigidităților mecanice**. Rigiditatea mecanică este introdusă, în relația următoare, ca o cauză a mișcării (vibrației), astfel

$$vibratie (raspuns) = \frac{forța}{rigiditate dinamica (constrangere)} \quad (2)$$

Apariția unui defect în structură înseamnă o modificare locală a rezistenței acesteia, deci a rigidității, la mișcare. Aceasta duce la o modificare a regimului de vibrație. Specificul metodei SIEM constă în înregistrarea undelor Lamb staționare: acestea au vârfurile și nodurile fixe în timp, spre deosebire de undele Lamb călătoare, utilizate în alte metode defectoscopice. Undele Lamb staționare apar la anumite frecvențe, “cuantizabile” precum energia straturilor electronice în atom. Pentru structuri având geometrii regulate (disc, placă dreptunghiulară), aceste frecvențe pot fi analitic definite, a se vedea de exemplu lucrarea citată *Rugina ș. a., 2014*. **Tabelul 1** prezintă o mostră a frecvențelor de rezonanță teoretice  $v_t$  și experimentale  $v_{exp1}$  pentru specimenul disc fără defect, și pentru un specimen disc cu defect simulat “arc la 45 mm”, și a valorilor experimentale  $v_{exp2}$ . Tabelul este edificator în sensul unei observații aparținând invenției. Defectul la 45 mm este relativ depărtat de senzor, și acesta nu poate să îl “detecteze”. Raza de acțiune a senzorului, conform invenției, trebuie

stabilită în cadrul concepției sistemului de monitorizare a stării de sănătate a structurii, în funcție de tipologia defectelor posibile și de performanțele senzorilor. În speță, defectul “arc la 7 mm” este bine detectat, în sensul invenției, conform Tabelul 2: valorile rezonanțelor din banda (19 ÷ 53) kHz se despică fiecare în câte 3 vârfuri de pseudorezonanțe. Acest număr de vârfuri poate varia, după caz. De remarcat că frecvența de rezonanță 12,57 kHz de tip mod de încovoiere nu s-a despicat, și nici frecvența de rezonanță 35.95 kHz, de tip mod axialsimetric (Rugina, C., Toader, A., Giurgiutiu, V., Ursu, I., *The electromechanical impedance method for structural health monitoring of thin circular plates, Proceedings of the Romanian Academy, Series A, Mathematics, Physics, Technical Sciences, Information Sciences, 2014, vol. 15, no. 3, pp. 272–282*). Cazul arătat în Tabelul 2 este ilustrat și în **Figura 6**, unde numărătoarea vârfurilor de rezonanță se face cu un algoritm online.

Tabelul 1. Frecvențele de rezonanță, teoretice și experimentale, disc sănătos, disc cu defect “arc la 45 mm”

$V_t$ [kHz]	12.57	19.69	28.38	<b>35.67</b>	38.63	50.51	63.95	78.97	<b>93.95</b>	95.57
$V_{exp1}$ [kHz] <sup>+</sup>	12.48	19.46	28.23	<b>35.89</b>	38.51	50.01	62.90	77.02	<b>92.04</b>	93.85
$V_{exp2}$ [kHz] <sup>++</sup>	12.81	20.08	28.88	<b>35.79</b>	39.20	50.93	64.07	78.43	<b>93.48</b>	94.82

Tabelul 2. Frecvențele de rezonanță, teoretice și experimentale, disc sănătos, disc cu defect “arc la 7 mm”

$V_t$ [kHz]	12.57	19.69			28.38			<b>35.67</b>	38.63			50.51		
$V_{exp1}$ [kHz] <sup>+</sup>	12.83	20.17			29.05			<b>35.95</b>	39.44			51.39		
$V_{exp2}$ [kHz] <sup>++</sup>	12.6	19.6	20.1	23.1	27.6	28.1	31.2	<b>35.33</b>	37.4	38.3	40.6	48.6	49.6	52.2

E greu de imaginat o metodă analitică prin care să se anticipeze evoluția unui vârf de rezonanță în prezența unui defect. Relația (2), fenomenologică, arată însă clar că vibrația inițială, reprezentată de frecvența de rezonanță, se substituie în prezența defectului printr-o formă vibratorie complicată, ușor însă de detectat prin procesarea semnăturii SIEM înregistrată direct, online.

Într-o a doua etapă, de probe în condiții dure, s-a desfășurat un protocol complex de teste pentru specimene disc cu defecte simulate, într-un numat suficient de mare pentru a se asigura o bază statistică, protocol rezumat în Tabelul 3. Echipamentul utilizat: sursă de iradiere, o Cameră Gamma 5000; vas Dewar criogenic; etuvă cu controller digital de temperatură. Datele privind condițiile din spațiu sunt referite în multe surse, de exemplu, în (Nymmik, R., *Initial conditions for radiation analysis: Models of galactic cosmic rays and solar particle events, Advances in Space Research, vol. 38, pp. 1182–1190, 2006*; Fixsen, D., *The temperature of the cosmic microwaves background, Astrophysical Journal, 707, pp. 916–920, 2009*).

Metoda SIEM este testată astfel pentru prima dată, după informațiile disponibile la această oră, cu simularea simultană a condițiilor de temperaturi extreme și iradiații. Analiza statistică făcută în urma procesării rezultatelor arată că metoda defectoscopică SIEM a trecut aceste probe (Ursu, A., Enciu, D., Toader, A., *Towards structural health monitoring of space vehicles, Aircraft Engineering*

and Aerospace Technology, submitted, under review; Enciu, D., Ursu, I., Toader, A., Tudose, M., Online damage identification and offline damage metrics evaluation in SHM, International Conference on Advances in Vibrations – VIBRATIONS 2015, 30 March – 01 April 2015, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal). Această analiză a avut drept criteriu-suport utilizarea unui indicator statistic de defect DI a cărui expresie este

$$DI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [\text{Re}(Z_i) - \text{Re}(Z_i^0)]^2}{\sum_{i=1}^N [\text{Re}(Z_i^0)]^2}} \quad (3)$$

unde  $N$  este numărul de frecvențe în spectru, iar 0 este un exponent care marchează structura în condiția inițială (“sănătoasă”, fără defect).

Tabelul 3. Protocolul testelor complexe (temperaturi extreme, radiații, vacuum) efectuate asupra unui număr de specimene disc. (\*f.v. – fără vacuum; \*\*f.i. – fără iradiatii; TC – temperatura camerei)

ciclu de testare	timp	temperatură [°C]	presiune [Pa]	iradiere [kGy]		
				doză per pas de iradiere	doză per ciclu	doză cumulată
SIEM inițială – TC						
#1	0.5 h	-196	1-10 <sup>-2</sup>	2.35	4.7	4.7
	1.0 h	RT	f.v.*	f.i.**		
	0.5 h	+100	1-10 <sup>-2</sup>	2.35		
1. SIEM – TC						
#2	0.5 h	-196	1-10 <sup>-2</sup>	2.35	4.7	9.4
	1.0 h	RT	f.v.*	f.i.**		
	0.5 h	+100	1-10 <sup>-2</sup>	2.35		
2. SIEM – TC						
#3	0.5 h	-196	1-10 <sup>-2</sup>	2.35	4.7	14.1
	1.0 h	RT	f.v.*	f.i.**		
	0.5 h	+100	1-10 <sup>-2</sup>	2.35		
3. SIEM – TC						
#4	1.0 h	RT	1-10 <sup>-2</sup>	4.7	4.7	18.8
	4. SIEM – TC					
#5	0.5 h	-196	1-10 <sup>-2</sup>	2.35	4.7	23.5
	1.0 h	RT	f.v.*	f.i.**		
	0.5 h	+100	1-10 <sup>-2</sup>	2.35		
5. SIEM – TC						

Testări izolate ale metodei SIEM, fie la temperatura camerei, fie la temperaturi extreme, fie la iradiatii, sunt consemnate în literatura domeniului (Lin, B., Mendez-Torres, A. E., Gresil, M., Giurgiutiu, V., Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors exposed to irradiation effects, ASME 2012 Pressure Vessels and Piping Division Conference, 15-19 July 2012, Toronto, Ontario, Canada, paper PVP2012-78848; Lin, B., Giurgiutiu, V., Pollock, P., Xu, B., and Doane, J., Durability and survivability of piezoelectric wafer active sensors on metallic structure, AIAA Journal, vol. 48, no. 3, pp. 635-643, 2010). Lipsind numitorul comun, respectiv un experiment complex, în care un specimen dat să parcurgă un protocol cuprinzând toate aceste condiții de mediu

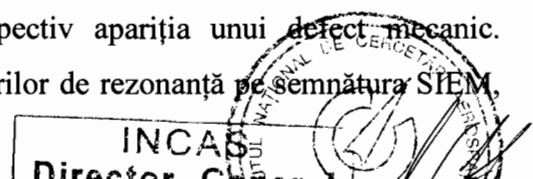


într-o succesiune stabilită, a lipsit și cadrul de referință pentru identificarea defectelor mecanice, structurale, simultan cu separarea lor de falsele defecte, determinate ca modificări reversibile pe semnăturile SIEM în prezența factorilor de mediu mai sus numiți.

Rezultatul nou, conform invenției, este un procedeu complex de identificare online a defectelor reale, a căror origine stă în îmbătrânirea și oboseala structurii, sau în vicii ascunse de fabricare, procedeu prin care sunt concomitent separate defectele false, respectiv semnăturile pe caracteristica SIEM ale prezenței condițiilor extreme de mediu, temperaturi extreme și irradiații. Acestea sunt numite defecte false, întrucât nu au un impact remanent asupra semnăturii SIEM, în sensul că semnătura sănătoasă se restabilește odată cu revenirea la condițiile inițiale (**Figura 4**). În contextul unui sistem în situ de monitorizare a stării de sănătate, în care indicatorul statistic uzual de defect DI (3) (Enciu, D., Tudose, M., Neculaescu, B., Toader, A., Ursu, I., *Damage identification and damage metrics in SHM – structural health monitoring –*, Proc. AEROSPATIAL 2014, ISSN 2067-8614, pp 349-364, 2014; Giurgiutiu, V., *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors*, Elsevier Academic Press, 2<sup>nd</sup> edition, 2014) stă la baza unui algoritm de alarmare, modificările produse pe semnătura SIEM de factorul temperatură ambientală, chiar compensate printr-o procedură specială de compensare (Ursu, I., Enciu, D., Toader, A., *Towards structural health monitoring of space vehicles*, Aircraft Engineering and Aerospace Technology, submitted, under review), vor contribui prin aport cantitativ la declanșarea unei alarme inoportune, nejustificată. O componentă secundară a invenției de față constă în următoarele. Factorii de mediu au impact vizibil pe semnătura SIEM esențialmente prin intermediul elementului piezo, și mult mai puțin, chiar neglijabil pentru anumite structuri, acest impact are punct de plecare în modificări structurale propriuzise. Pentru un proiect dat, în speță pentru o navă spațială, un sistem de monitorizare a stării de sănătate a structurii trebuie să prevadă și să elimine printr-o selecție adecvată a senzorilor, impactul temperaturilor extreme, în special al celor pozitive foarte ridicate. Scăderea dramatică a rezistenței  $Re Z(\omega)$ , măsurată în Ohm, se impune a fi un asemenea criteriu de selecție a senzorilor. Această observație se aplică și asupra sistemelor de monitorizare care privesc construcțiile civile, centralele energetice, inclusiv nucleare, în care pot opera factori de mediu extremi, la o magnitudine eventual mai redusă decât în spațiu.

**Figura 5** sintetizează observațiile care au stat la baza procedurilor offline de detectare a defectelor mecanice și de separare de cele false, de origine ambientală, în vederea evitării falselor diagnoze.

**Figura 6** ilustrează funcționarea unui algoritm simplu de monitorizare și identificare algoritmică a apariției unor noi vârfuri, reprezentate cu linie intrerupta, pe semnătura SIEM a structurii sănătoase (reprezentate cu linie continua), respectiv apariția unui defect mecanic. Algoritmul constă într-o rutină de calcul al numărului vârfurilor de rezonanță pe semnătura SIEM,



într-o bandă de frecvență prestabilită. Semnătura SIEM, reprezentabilă grafic, este furnizată de către unitatea de calcul ca un șir de valori discrete, cu un anumit pas de frecvență. Intervalul de frecvențe focalizat este prestabilit de către proiectantul sistemului de monitorizare. Dacă la monitorizarea sistemului, acest număr crește față de cel inițial, al semnăturii sănătoase, softul generează o alarmă de atenționare privind apariția unui defect mecanic. Vârfurile locale sub o anumită valoare, de exemplu,  $k\Omega$ , sunt identificate ca zgomote de măsură sau ca neinteresante, și sunt eludate de algoritm.

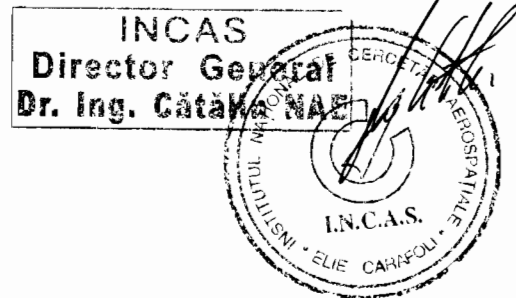
Procedeul propus în invenția de față se poate aplica într-un sistem de monitorizare a stării de sănătate a structurilor, bazat pe metoda SIEM, reprezentat în **Figura 7**. Sistemul cuprinde:

a) **blocul structural**, format din structura monitorizată și un număr de senzori piezo activi distribuiți, cu o rază de acțiune prestabilită în funcție de parametrii lor și de natura posibilelor defecte mecanice; b) **blocul de achiziție**, format dintr-un **multiplexor analogic programabil** care cuplează succesiv senzorii activi la intrarea analizorului de impedanță, și un **analizor de impedanță electromecanică**;

c) **blocul software și alarmare**, format din unitatea de calcul și un bloc de afișare/alarmare (un display).

Sub controlul unității de calcul, control realizat pe magistrala de comutare senzori, multiplexorul cuplează succesiv senzorii  $S_1, S_2, \dots, S_n$  de pe structură la intrarea analizorului de impedanță. Acesta achiziționează datele de la senzori, în domeniul de frecvență și cu pașii de frecvență pentru care a fost configurat la start de către unitatea de calcul.

După baleierea întregului domeniu de frecvență impus, analizorul de frecvență transmite datele  $(Z(\omega), S_i)$  pe magistrala de achiziție date și configurare, la unitatea de calcul. Aceasta procesează datele, conform invenției, pe baza procedurii de detectare, revendicarea R1, procedurii de separare, revendicarea R2, și procedurii de identificare algoritmică, revendicarea R3. Apariția defectului mecanic este semnalizată printr-o atenționare pe un ecran: "*defect în zona  $S_i$* " .





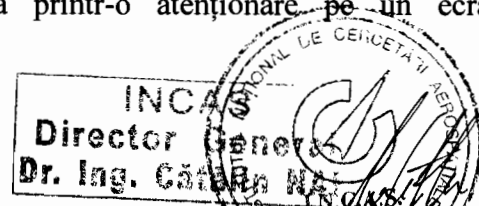
## REVENDICĂRI

1. **Procedeu de detectare (R1)** a apariției defectelor structurale, de tip fisuri incipiente, în cadrul metodei spectroscopiei impedenței electromecanice de monitorizare online a stării de sănătate a structurilor. Structura sănătoasă este definită de **semnătura** sa, spectrograma  $\text{Re}(Z(\omega))$ , care se obține și se validează offline, în condiția de referință a “temperaturii camerei”, **Figura 2**. Detectarea se bazează pe observația experimentală că vârfurile de rezonanță ale caracteristicii sănătoase  $\text{Re}(Z(\omega))$  se **despică** (se multiplică), marcând o deteriorare, un defect incipient, **Figura 3**.

2. **Procedeu de separare (R2)** în două clase a modificărilor posibile pe semnătura  $\text{Re}(Z(\omega))$ , conform cu revendicarea 1 : a) modificări prin despicarea unor vârfuri de rezonanță în mai multe vârfuri vecine, într-o bandă de frecvențe care poate fi identificată prin experimente anterioare, offline, **Figura 3** și b) modificări minore, neglijabile, care caracterizează prezența radiațiilor, **Figura 4 dreapta**, sau modificări cu afectarea mai mult sau mai puțin accentuată a amplitudinilor, și cu deplasare spre stânga a vârfurilor de rezonanță, pentru temperaturi pozitive crescute, și spre dreapta, pentru temperaturi negative, **Figura 4 stânga**. Prin urmare, prezența condițiilor dure de mediu, temperaturi extreme și irradiații, **nu determină despicarea vârfurilor de rezonanță**. În schimb, au loc modificări practic insesizabile pe semnătura structurii, în cazul irradiațiilor, și se consemnează deplasări “du-te vino” ale vârfurilor de rezonanță, (spre stânga, revenire, spre dreapta, revenire), la parcurgerea unui ciclu complet (temperatura camerei, temperaturi pozitive, temperatura camerei, temperaturi negative, temperatura camerei).

3. **Procedeu de identificare algoritmică online (R3)** a apariției defectelor structurale, **Figura 6**. Algoritmul constă într-o rutină de calcul al numărului vârfurilor de rezonanță pe semnătura SIEM, într-o bandă de frecvențe dată. Dacă acest număr crește față de cel inițial, al semnăturii sănătoase, soft-ul poate genera o alarmă de atenționare privind apariția unui defect mecanic.

4. **Sistem de monitorizare a defectelor mecanice, cu evitarea falselor diagnoze provocate de modificările semnăturii  $\text{Re}(Z(\omega))$  în prezența condițiilor dure de mediu, Figura 7**. Sistemul conține un procedeu de detectare a apariției acestora, conform cu revendicarea 1 (R1), un procedeu de separare a modificărilor posibile pe semnătura  $\text{Re}(Z(\omega))$ , conform cu revendicarea 2 (R2), și un procedeu de identificare algoritmică a apariției defectelor mecanice, în conformitate cu revendicarea 3 (R3). Apariția defectului mecanic este semnalizată printr-o atenționare pe un ecran: "defect în zona  $S_i$ ".



Figuri (în număr de 7)

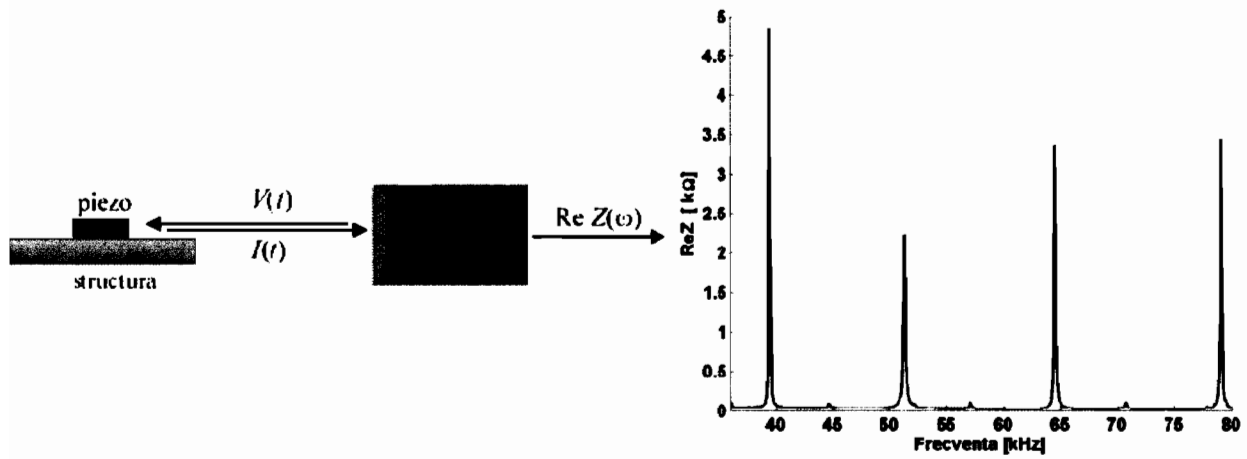
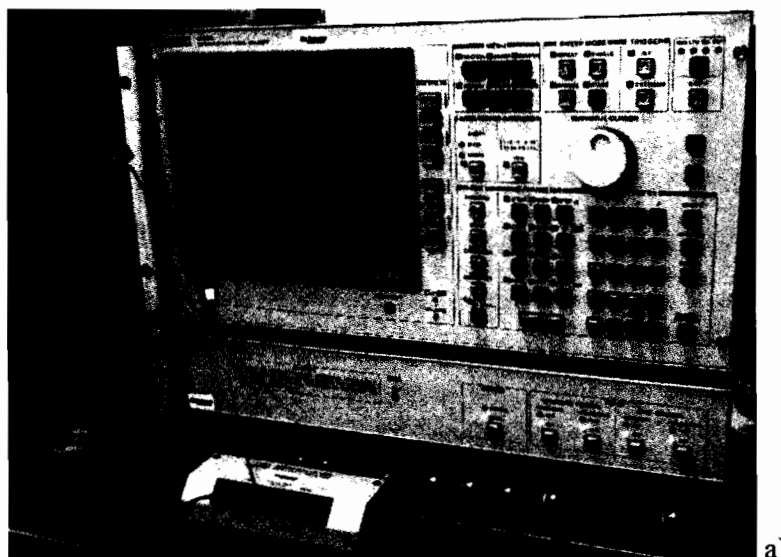
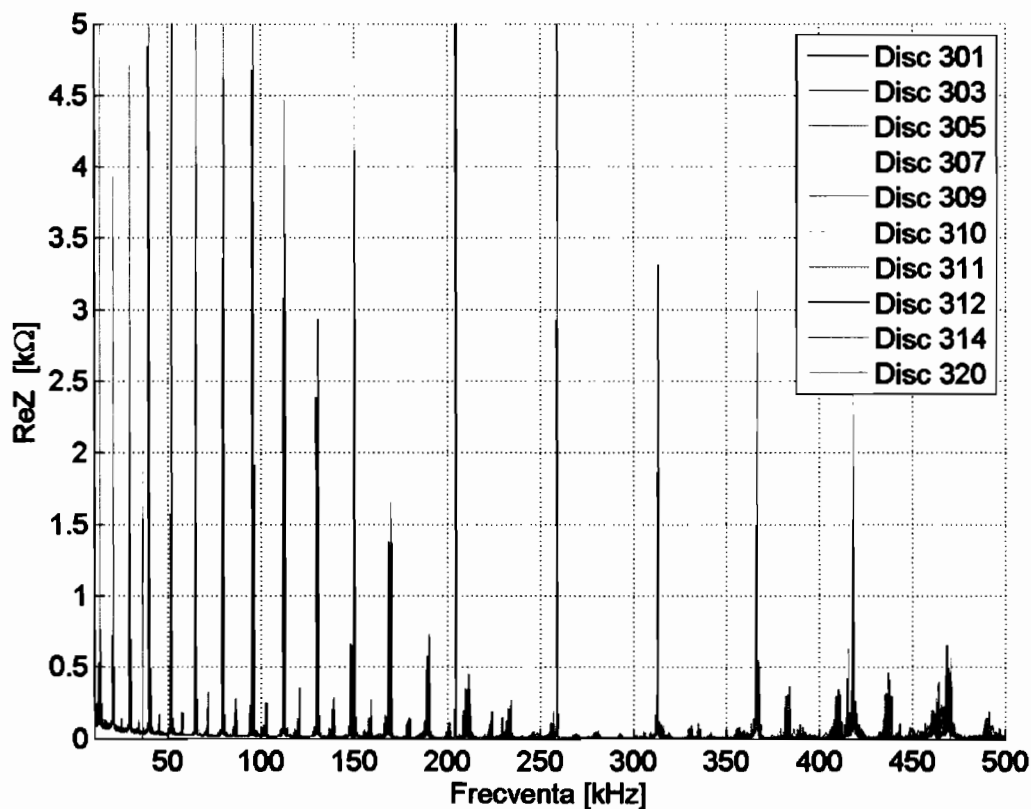


Figura 1. Configurația de bază a metodei spectroscopiei impedanței electromecanice (SIEM)

INCAS  
Director General  
Dr. Ing. Cătălin NAȘ  
INSTITUTUL NAȚIONAL DE CERCETĂRI AEROSPAZIALE  
"ELIE CARAFOLU" IRIȘI  
L.N. 2011



a)



b)

Figura 2. Cadrul experimental de referință al metodei SIEM (temperatura camerei): a) specimen-disc (stânga jos), analizor de frecvență, b) procesare standard cu o unitate de calcul, obținerea semnăturii stării de sănătate a structurii (specimenului)

INCAS  
Director General  
Dr. Ing. Cătălina  
INSTITUTUL NAȚIONAL DE CERCETĂRI ȘI ÎNCALCĂRI  
I.N.C.A.S.  
ING. ELIE CARAFOLU

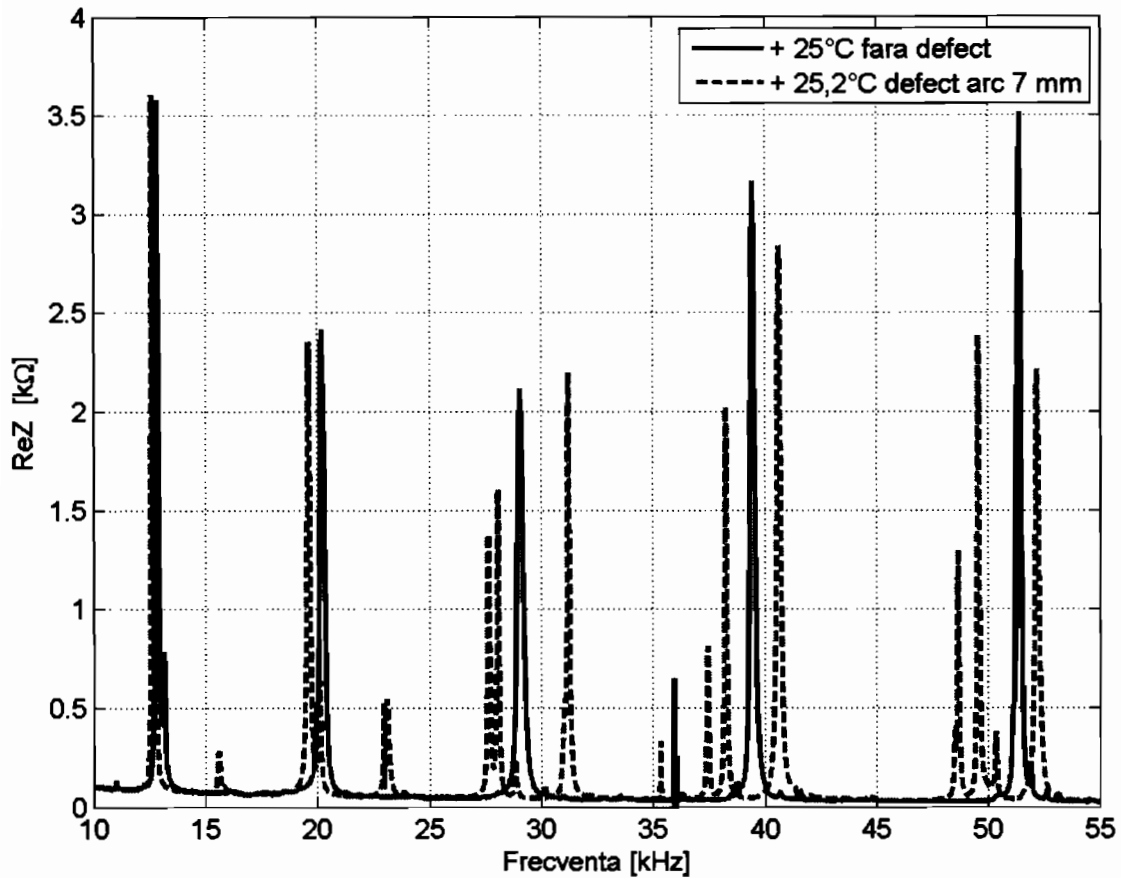


Figura 3. Influența defectului asupra semnăturii SIEM: “scindarea” vârfurilor de rezonanță din semnătura de referință, în mai multe vârfuri adiacente

INCAS  
Director General  
Dr. Ing. Cătălin NAE



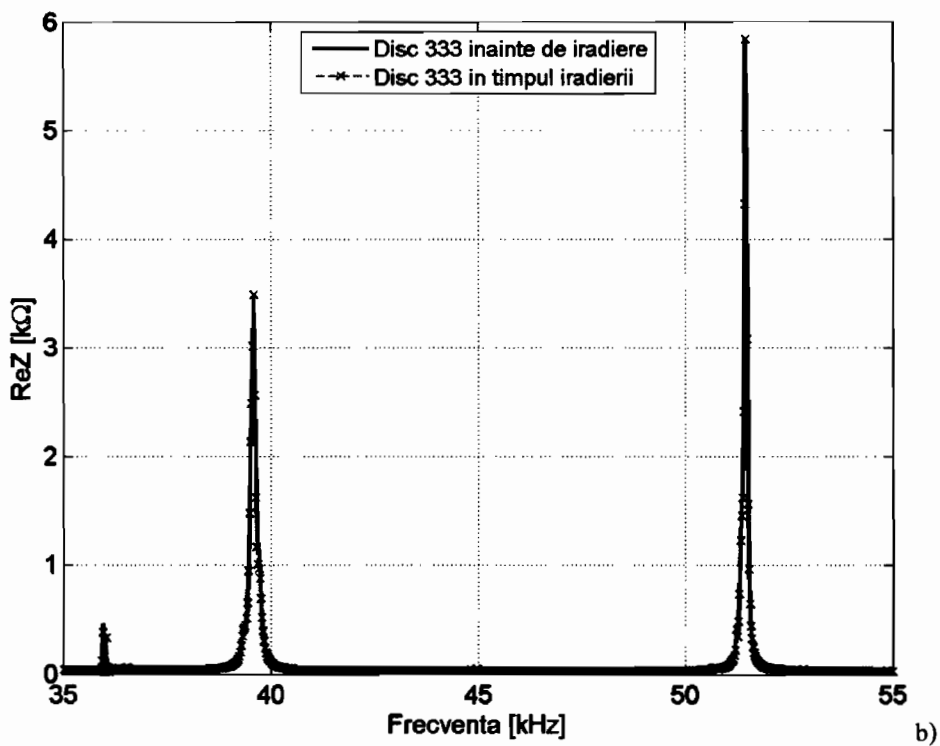
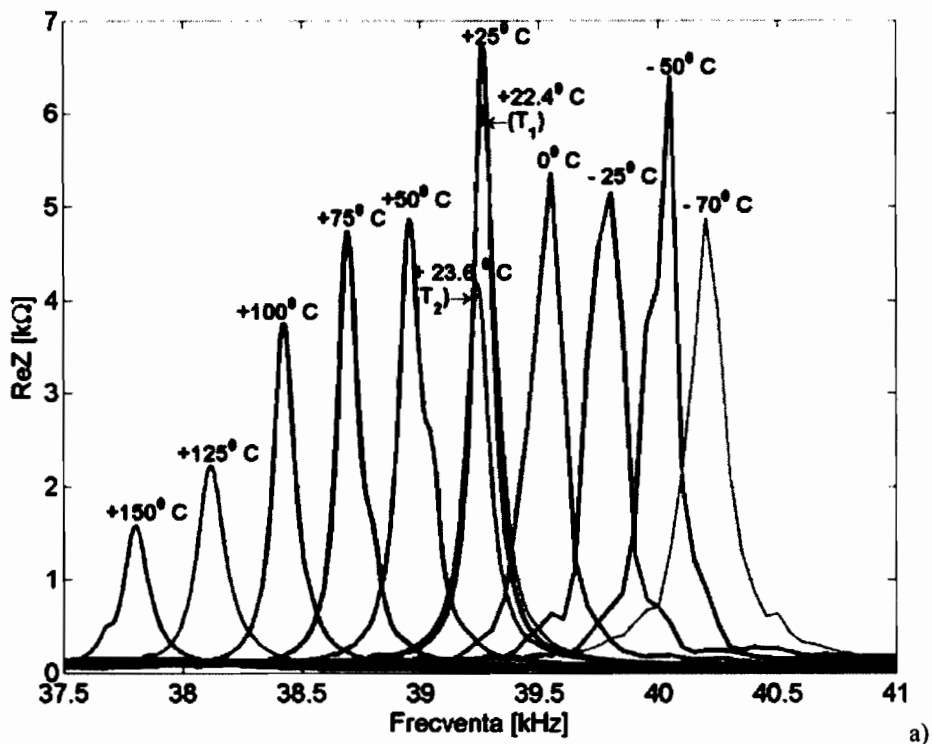


Figura 4. Prezența unor defecte false pe caracteristicile SIEM; a) ciclu de temperaturi extreme, cu 3 treceri prin temperatura “camerei”, notate cu  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ; b) neutralitatea semnăturii SIEM la iradiatii

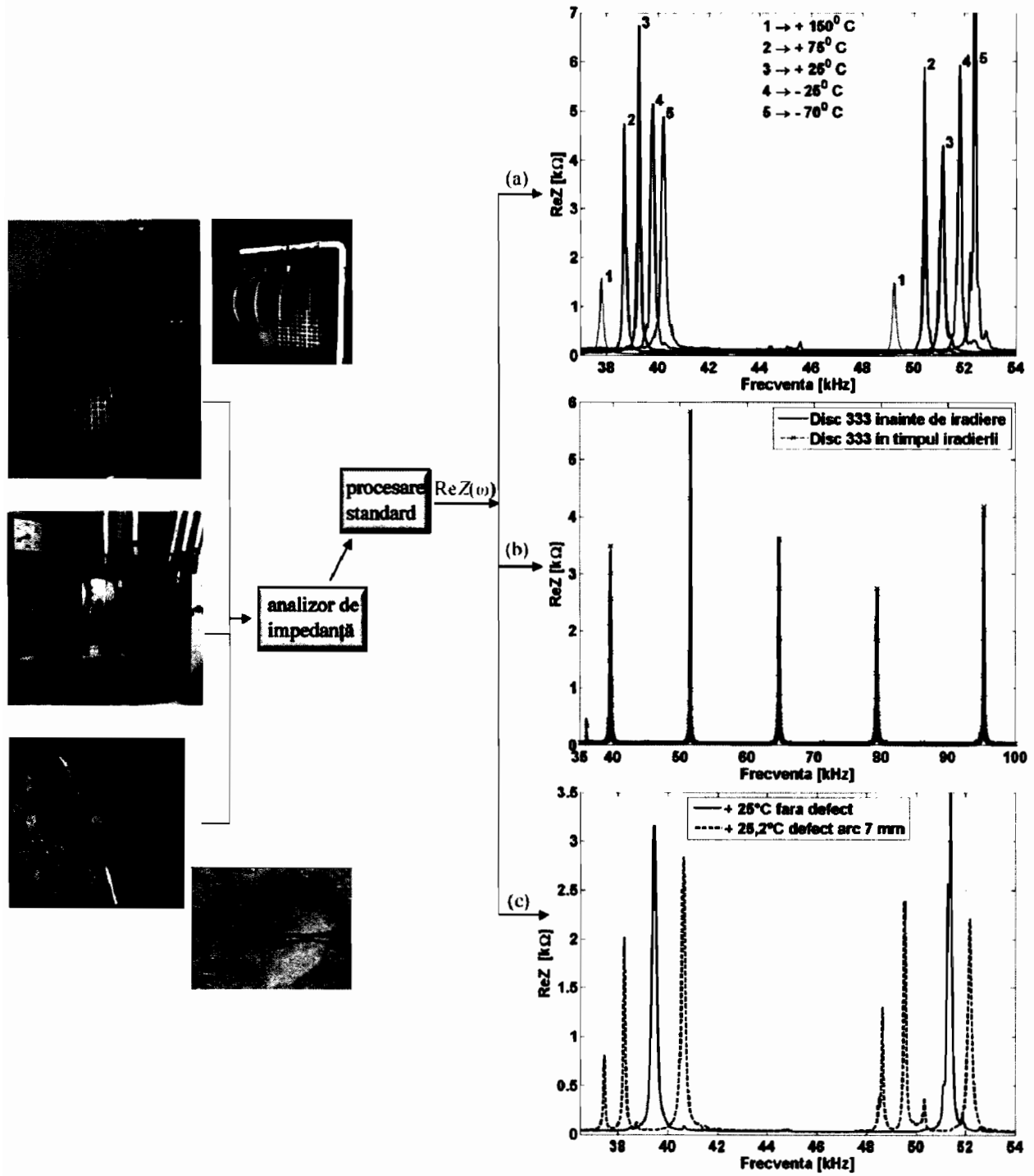


Figura 5. Ilustrarea bazei fenomenologice a procedeelor offline de detectare și separare a defectelor, conform revendicărilor R1 și R2

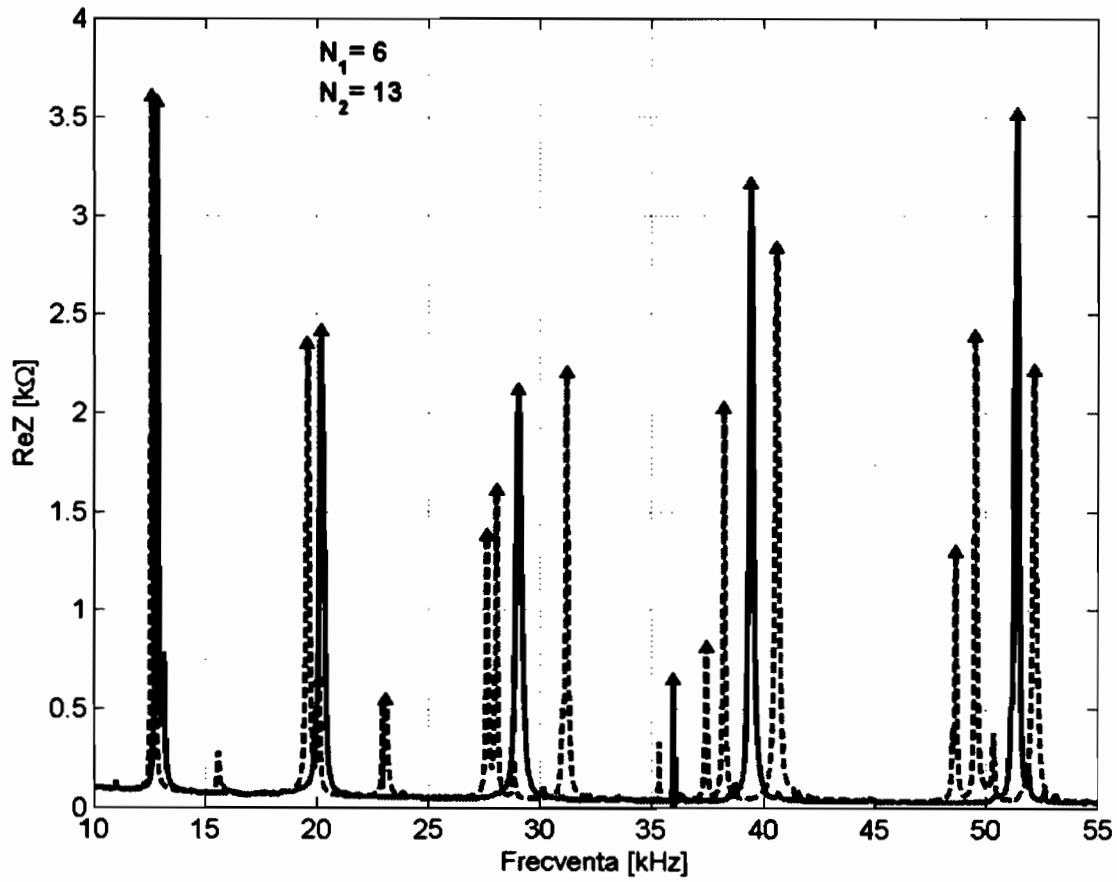
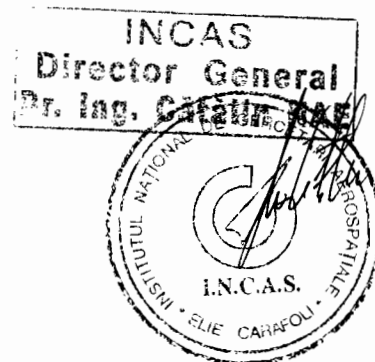


Figura 6. Ilustrarea funcționării algoritmului procedural pentru identificarea defectelor mecanice cu evitarea falselor diagnoze. Input algoritm:  $Re(Z)$ , output algoritm: grafic și identificare apariție defect mecanic:  $N_2 > N_1$



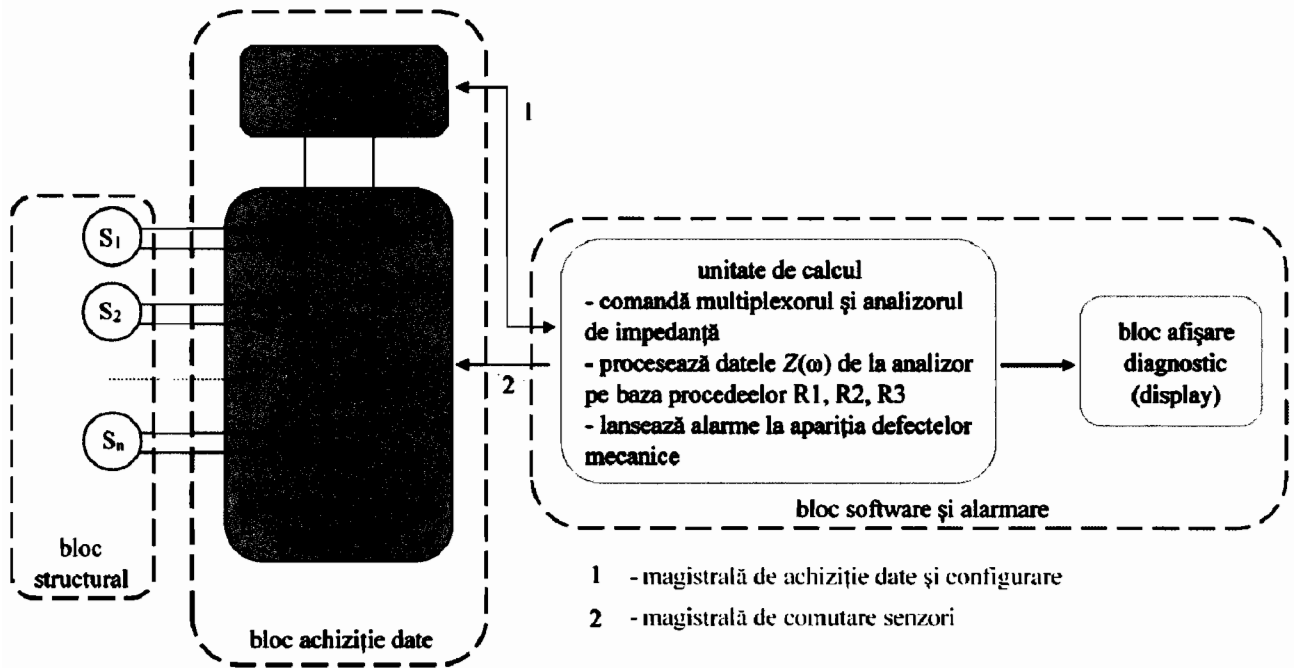


Figura 7. Sistem de monitorizare a stării de sănătate a structurilor, cu procedeu de identificare algoritmică a defectelor mecanice și evitarea falselor diagnoze

INCAS  
Director General  
Dr. Ing. Cătălin NAE

