



## ACADEMIA OAMENILOR DE ȘTIINȚĂ DIN ROMÂNIA

Strada Ilfov nr. 3, sector 5, 050044, București, România

Tel. +4 021 / 314 74 91; Fax +4 021 / 314 75 39

email: [secretariat.aosr@gmail.com](mailto:secretariat.aosr@gmail.com)

<http://aosr.ro/>

### COMPETIȚIA DE PROIECTE DE CERCETARE A ACADEMIEI OAMENILOR DE ȘTIINȚĂ DIN ROMÂNIA DESTINATĂ TINERILOR CERCETĂTORI „AOȘR-TEAMS-III” EDIȚIA 2024-2025 „TRANSFORMAREA DIGITALĂ ÎN ȘTIINȚE”

**Sesiunea științifică AOȘR tineri cercetători, etapa a III-a – Iulie 2024**

Titlul proiectului:

**Dezvoltarea unor metode de prelucrare a mărimilor electrice, bazate pe transformate specializate tip Wavelet, obținute de la un sistem mobil de achiziții de date capabil să interacționeze în internetul industrial al lucrurilor**

Domeniul științific: **Științe inginerești**

Membrii echipei de cercetare:

Conferențiar dr. ing. **Marian-Ștefan Nicolae** (Director Proiect) – Universitatea din Craiova, Facultatea de Inginerie Electrică

Cercetător științific **Livia-Andreea Dina** - Institutul Național de Cercetare - Dezvoltare și Încercări pentru Electrotehnică ICMET Craiova

# Raport de cercetare privind Dezvoltarea unor algoritmi pentru prelucrarea curenților și tensiunilor, axați pe variante îmbunătățite ale transformatei de tip Wavelet Packet Transform

În cadrul raportului se tratează prelucrarea unor mărimilor electrice cu variante îmbunătățite ale transformatei de tip Wavelet Packet Transform. Au fost efectuate activitățile prevăzute în planul de cercetare, și anume A3.1. Determinarea topologiei și elaborarea algoritmilor de descompunere/recompunere bazați pe transformata de tip Wavelet Packet Transform, respectiv A3.2. Optimizarea și testarea algoritmilor de descompunere/recompunere bazați pe transformata de tip Wavelet Packet Transform.

## A3.1. Determinarea topologiei și elaborarea algoritmilor de descompunere/recompunere bazați pe transformata de tip Wavelet Packet Transform

### 3.1. Determinarea clusterelor de noduri terminale și armonici care le afectează

Topologia arborelui folosit pentru descompuneri/recompuneri bazate pe transformata de tip Wavelet Packet Transform (WPT) studiată în această etapă este definită de: nod rădăcină care memorează șapte perioade (a câte 512 componente) din semnalul studiat, șapte niveluri, funcție mamă wavelet din familia Daubechies cu filtru de lungime 28 (căreia i se asociază denumirea „db14” în Matlab).

A fost elaborat un program pentru a evidenția tipul de asociere „noduri de pe ultimul nivel (notate cu N7) <-> ordine armonice cu pondere majoritară”, urmărindu-se reprezentarea pentru fiecare N7 a ordinelor armonice care au peste 50% din toată energia lor în nodul respectiv.

Tabelul 3.1. Tabel cu ordinea armonice cu pondere majoritară în nodurile arborelui WPT – selecție pentru ordine armonice mai mici decât 80

Indice nod	Ordine armonice cu pondere majoritară în nod	Indice nod	Ordine armonice cu pondere majoritară în nod	Indice nod	Ordine armonice cu pondere majoritară în nod	Indice nod	Ordine armonice cu pondere majoritară în nod
1	1	11	24 25 26	21	48 49 50	31	40 41 42
2	2 3 4	12	26 27 28	22	50 51 52	32	42 43 44
3	6 7 8	13	16 17 18	23	54 55 56	49	64 65 66
4	4 5 6	14	18 19 20	24	52 53 54	50	66 67 68
5	14 15 16	15	22 23 24	25	32 33 34	51	70 71 72
6	12 13 14	16	20 21 22	26	34 35 36	52	68 69 70
7	8 9 10	17	62 63 64	27	38 39 40	53	78 79 80
8	10 11 12	18	60 61 62	28	36 37 38	54	76 77 78
9	30 31 32	19	56 57 58	29	46 47 48	55	72 73 74
10	28 29 30	20	58 59 60	30	44 45 46	56	74 75 76

Tabelul 3.1 , generat de acest program, demonstrează următoarele:

- Fiecare N7 se asociază cu doar trei ordine armonice dacă se impune condiția ca ponderea lor energetică să fie majoritară. Aceste ordine se află în secvență de trei numere consecutive;
- În centrul secvenței se află întotdeauna un ordin armonic impar. De aceea va exista mereu o asociere biunivocă de tipul (număr nod  $\leftrightarrow$  ordin armonică impară), deoarece:
- ponderea armonicilor impare nu variază cu defazajul, conform studiilor efectuate pe semnale monoarmonice sau variază relativ puțin în jurul valorii aferente poluării monoarmonice, conform studiilor efectuate pe semnale multiarmonice;
- celelalte ordine armonice din tripleta aferentă nodului sunt ordine pare, acestea putând să apară în oricare dintre cele două noduri care formează așa-zisa „pereche de noduri dominantă” asociată lor.

Figura 3.1 prezintă pe orizontală nodurile terminale și pe verticală ordinele armonicelor dominante asociate lor.

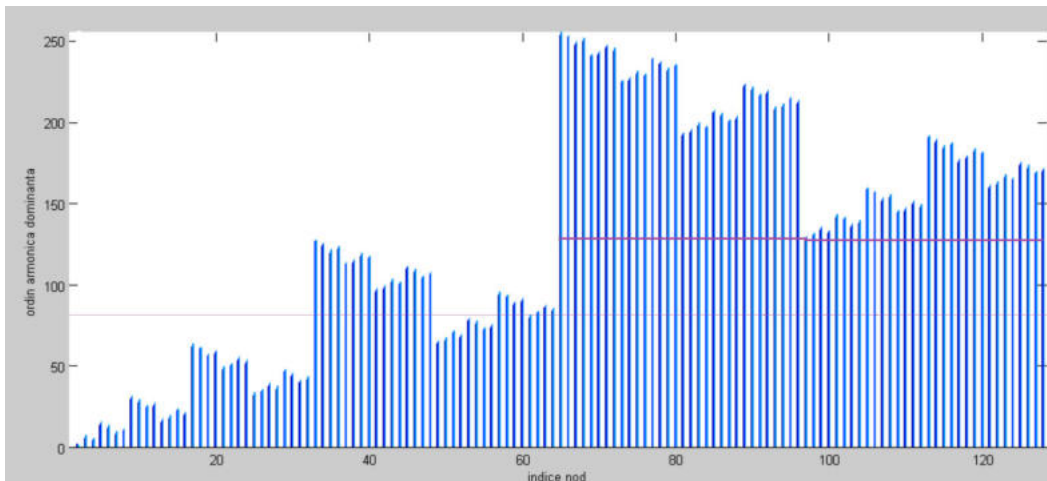


Fig. 3.1. Ordine armonice dominante în nodurile terminale

O primă observație referitoare la gamele de noduri consecutive se bazează pe două „valori de prag” pentru ordinul armonic:

- o gamă extinsă de noduri consecutive asociate cu ordine armonice majoritare care depășesc ordinul armonic 120 (ordin delimitat de linia orizontală mai groasă). Este vorba de nodurile care formează o gamă continuă începând cu nodul cu indicele 64, adică toate cele care se generează din subarborele drept al arborelui WPT complet;
- noduri consecutive asociate cu ordine armonice majoritare care depășesc ordinul armonic 80 (ordin delimitat de linia orizontală mai subțire). Din această clasă fac parte toate nodurile din clasa mai sus menționată, precum și nodurile din alte 3 game consecutive, asociate unor numere de noduri cu indici mai mici decât 64.

În vederea rafinării clusterizării nodurilor astfel încât un cluster să fie asociat unor grupuri cât se poate de restrânse de armonici consecutive cu pondere majoritară, a fost generată diagrama din fig. 3.2, în care este reprezentat numărul nodului în funcție de ordinul armonic, dacă acest ordin este majoritar (automat armonicile pare au două astfel de noduri).

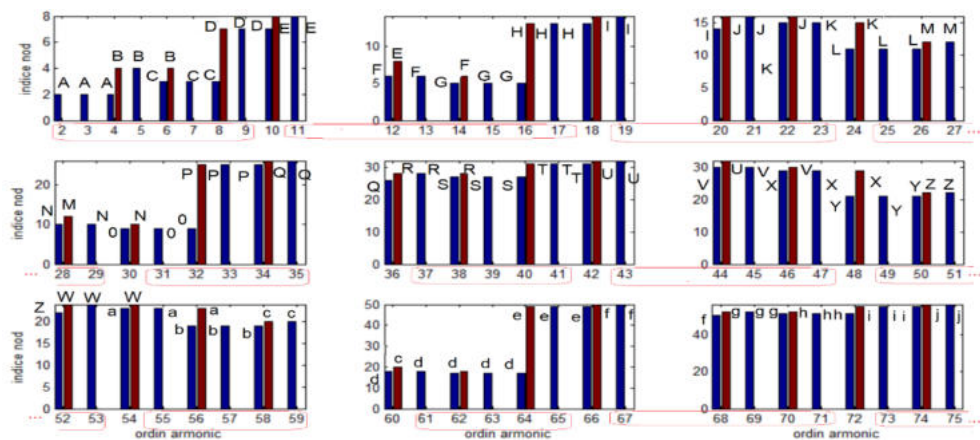


Fig. 3.2. Clustere „noduri terminale” vs „ordine armonic”.

S-a realizat o analiză conjugată a:

- diagramei din fig. 3.2 ;
- ordinelor armonice ale armonicilor impare (s-a observat că acestea apar în toate clusterelor cu două, patru sau opt componente în formă de perechi ale căror ordine armonice sunt separate prin valoarea 2 (de exemplu perechea simplă formată din armonicile 3 și 5, cuadruplul în care apar perechile de ordine armonice (11,13) sau (19,21), setul de 8 în care apar perechile (43,45), (51,53), (75,77) și (83,85) etc.);
- ordinelor armonice pare consecutive (separate prin numărul 2), care afectează aceleași perechi de noduri.

S-a observat formarea unor clustere de noduri în care se regăsește majoritatea energiei din ordine armonice consecutive. Clusterelor sunt desemnate în fig. 3.2 prin elipse care încercuiesc ordinele armonice asociate lor, iar literele desemnează nodurile care au același ID. Există anumite ordine armonice pare care nu aparțin în mod clar unui anumit cluster, deoarece nodurile afectate în mod complementar de energia lor fac parte din două cluster adiacente. În figura 3.2 acestea nu aparțin elipselor, ci apar între două elipse consecutive.

Tabelul 3.2 prezintă modul de mapare a gamelor de armonici și a nodurilor în cluster, determinat în urma analizei conjugate menționate anterior.

Tabelul 3.2. Maparea gamelor de armonici și a nodurilor în cluster până la ordinul armonic 71

ID cluster	Limite gamă armonici	Set de noduri N7 WPT asociat	ID cluster	Limite gamă armonici	Set de noduri N7 WPT asociat
1	2,9	2,3,4,7	12	42	31,32
2	10	7,8	13	43,47	29,30,32
3	11,17	5,6,8,13	14	48	21,29
4	18	13,14	15	49,53	21,22,24
5	19,23	14,15,16	16	54	55,56
6	24	11,15	17	55,59	19,20,23

7	25,29	10 , 11 ,12	18	60	18,20
8	30	9,10	19	61,65	17 ,18 ,49
9	31,35	9 , 25, 26	20	66	49,50
10	36	26,28	21	67,71	50,51,52
11	37,41	27 ,28,31			

Se observă că gama de ordine armonice care uzual au ponderi semnificative (ordine armonice până la ordinul 71) afectează noduri ale căror indici nu depășesc valoarea 52. Această observație este în concordanță cu fig. 3.1.

### 3.2. O tehnică originală de evaluare a gamelor de armonici responsabile pentru nestaționaritate

Folosind o tehnică specială de adnotare, au fost deduse mai multe topologii de subarbori WPT. Acești subarbori conțin doar nodurile WPT care trebuie descompuse pe fiecare nivel (de sus în jos) atunci când apar deviații în energiile vectorilor de detalii asociați nivelurilor din arborele DWT corespunzătoare, aferente ordinelor armonice. Deoarece analiza s-a concentrat pe ordine armonice de până la 52 (acestea afectând nivelurile DWT 3...7), s-au construit trei tipuri de topologii:

- primul tip corespunde cazurilor când este afectat un singur nivel DWT, obținându-se subarborii pe care îi vom nota în continuare  $L_x$ , cu  $x$  de la 3 la 7 (de exemplu  $L_3$  este subarborii WPT care trebuie parcurs dacă a fost afectat doar al treilea nivel DWT);
- al doilea tip corespunde cazurilor când sunt afectate două niveluri DWT adiacente (se obțin subarborii pe care îi vom nota în continuare  $L_{xy}$ , cu  $x=3...6$  și  $y=(x+1)...7$  (de exemplu  $L_{34}$  este subarborii WPT care trebuie parcurs dacă au fost afectate nivelurile DWT 3 și 4);
- al treilea tip corespunde cazurilor când sunt afectate trei niveluri adiacente (se obțin subarborii pe care îi vom nota în continuare  $L_{xyz}$ , cu  $x=3...5$ ,  $y=(x+1)...6$  și  $z=(y+1)...7$ .

Tabelele 3.3, 3.4 și 3.5 prezintă componența acestor subarbori, prin evidențierea id-urilor de noduri pe fiecare nivel WPT, considerând cel mai din stânga nod ca având id-ul 1.

Tabelul 3.3 – Topologiile arborilor  $L_3...L_7$

ID subarbori Id noduri WPT per nivel	L3	L4	L5	L6	L7
Nivel 1	1,2	1	1	1	1
Nivel 2	1,2,4	1,2	1	1	1
Nivel 3	2..4,7,8	1,2,4	1,2	1	1
Nivel 4	3..8,13,14,16	2...4,7,8	1,2,4	1,2	1
Nivel 5	5,6,8..16,20,25...28,31	3..8,13,14,16	2..4,7,8	1,2,4	1,2
Nivel 6	9...12,15,17...32,49,50..56,61,62	5,6,8..16,25...28,31	3....8 ,13,14,16	2..4,7,8	1,2,4
Nivel 7	17...24,29,30,33...64, 97...112,121...124	9..12,15,17..32, 49..56,61,62	5,6,8...16, 25..28,31	3,5...8,13,14,16	2..4,7

Tabelul 3.4. Topologiile arborilor L23,L34, L45, L56 și L67

ID subarbore Id noduri WPT per nivel	L23	L34	L45	L56	L67
Nivel 1	1,2	1,2	1	1	1
Nivel 2	1,...,4	1,2,4	1,2	1	1
Nivel 3	2,...,8	1..4,7,8	1,2,4	1,2	1
Nivel 4	3...16	2...8,13,14,16	1...4,7,8	1,2,4	1,2
Nivel 5	5,6,8...32	3...16,25..28,31	2...8,13,14,16	1..4,7,8	1,2,4
Nivel 6	9...12,15,17...64	5,6,8...32,49...56,61,62	3...16,25...28,31	2..8,13,14,16	1...4,7,8
Nivel 7	17...128	9..12,15,17...64, 97..112,121..124	5,6,8...32,49, 50...56,61,62	3,5...16,20, 25..28,31	2...8, 13,14,16

Tabelul 3.5. Topologiile arborilor asociați tripletelor de 3 nivele adiacente

ID subarbore Id noduri WPT per nivel	L123	L234	L345	L456	L567
Nivel 1	1,2	1,2	1,2	1	1
Nivel 2	1...4	1...4	1,2,4	1,2	1
Nivel 3	2...8	2...8	1,2,3,4,7,8	1,2,4	1,2
Nivel 4	3...16	2...16	1..8,13,14,16	1..4,7,8	1,2,4
Nivel 5	5,6,8...32	3...32	2...16,25...28,31	1...8,13,14, 16	1...4,7,8
Nivel 6	9...12,15,17...64	5,6,8...64	3...32,49...56,61,62	2..16,25...2 8,31	1...8,13,14,16
Nivel 7	17...24,29,30,33 ...128	9...12,15, 17...128	5,6,8...64,97....112, 121...124	3,5...32, 49..56,61,62	2...16, 25..28,31

Considerând rezultatele obținute, tabelul 3.6 prezintă informațiile aferente modului de alocare a nodurilor la clustere împreună cu subarborile (subarborii) care includ nodurile din clusterul respectiv. Decizia pe care o ia un algoritm folosit pentru identificarea ordinelor armonice responsabile pentru nestăționaritate se face în funcție de clusterul și nodul/nodurile ale căror energii s-au modificat. Se prezintă un exemplu: dacă s-a identificat cu ajutorul subarborelui L5 faptul că a avut loc o deviație energetică în clusterul 3, mai precis în nodul 14, se raportează gama de armonici 18...20 ca fiind responsabilă pentru deviație. Pe lângă informația asociată gamei restrânse de armonici, se află și momentul de timp în care a apărut deviația de staționaritate, posibilitate pe care transformata FFT nu o poate oferi.

Tabelul 3.7 prezintă o sinteză a modului de alocare clustere-subarborii.

Deoarece subarborii L6 și L7 sunt utilizați pentru o gamă foarte restrânsă de noduri și implicit pentru o gamă foarte restrânsă de armonici, nu mai este necesară o rafinare suplimentară a căutării (gamei de) ordin(e) armonice(i) implicate în devierea de la staționaritate.

Tabel 3.6. Asocierea „clustere de noduri”- subarbori- „noduri WPT terminale” – „armonici majoritare” pentru ordine armonice mai mici de 72.

ID Cluster	Id-uri noduri N7 aferente clusterului	Subarbore	Armonici majoritare din			
			primul nod din cluster	al 2-lea nod din cluster	al 3-lea nod din cluster	al 4-lea nod din cluster
1	2,3,4,7	L7	2/3/4	6/7/8	4/5/6	8/9/10/
2	5,6,8,13	L6	14/15/16/	12/13/14/	10/11/12/	16/17/18/
3	14,15,16	L5	18/19/20/	22/23/24/	20/21/22/	-
4	10 , 11 ,12	L4,L5	28/29/30/	24/25/26/	26/27/28/	-
5	9 , 25, 26	L4	30/31/32/	32/33/34/	34/35/36/	-
6	27 ,28,31	L4,L5	38/39/40/	36/37/38/	40/41/42/	-
7	29 ,30, 32	L4	46/47/48/	44/45/46/	42/43/44/	-
8	21, 22, 24	L3,L4	48/49/50/	50/51/52/	52/53/54/	-
9	19,20,23	L3,L4	56/57/58/	58/59/60/	54/55/56/	-
10	17 ,18 ,49	L3,L4	62/63/64/	60/61/62/	64/65/66/	-
11	50,51,52	L3,L4	66/67/68/	70/71/72/	68/69/70/	-

Tabel 3.7. Maparea clusterelor în subarbori

Identificator subarbore	Lista identificatori clustere asociate subarborelui	Identificator subarbore	Listă identificatori clustere asociate subarborelui
L3	8...11	L45	3...11
L4	4...11	L6	2
L34	4...11	L7	1
L5	3,4,6		

Clusterelor își dovedesc cu prisosință utilitatea atunci când apar deviații de la staționaritate aferente gameilor de noduri asociate subarborilor L3...L5. Astfel, la subarborile L5 se realizează o segmentare a gameii de indici folosind trei clusterelor, la subarborile L3 segmentarea se face folosind patru clusterelor, iar la L4 se utilizează opt clusterelor. Subarborii asociați modificării a două niveluri adiacente (de tipul L<sub>xy</sub>) beneficiază de reuniunea clusterelor asociate fiecărui subarbore elementar, așadar L45 beneficiază de nouă clusterelor. Aceste segmentări aduc un câștig de timp de execuție considerabil. Deoarece există o probabilitate mai mare ca deviația de la staționaritate să fie produsă de armonici de ordin mai scăzut, căutarea în cadrul unui subarbore trebuie efectuată într-o ordine impusă de această observație.

În concluzie, un câștig substanțial relativ la timpul de execuție și memoria consumată s-a obținut prin conceperea și implementarea unor funcții originale, apelate în funcție de eticheta asociată fiecărui nod din fiecare nivel al subarborelui WPT curent. Astfel: (a) la descompunere se poate opta pentru calculul a doar unul dintre vectorii de aproximări, respectiv detalii; (b) la recompunere, este posibil ca unul dintre vectorii mai sus menționați folosiți pentru recompunere să fie 0.

## A3.2. Optimizarea și testarea algoritmilor de descompunere/recompunere bazați pe transformata de tip Wavelet Packet Transform. Utilizarea WPT pentru evaluarea parametrilor armonicilor folosind sisteme liniare

În capitolul anterior s-a demonstrat că nodurile de pe ultimul nivel al arborelui WPT (“N7”), considerând că pe primul nivel este doar nodul rădăcină, sunt grupate în clustere: nodurile N7 cu cei mai mici identificatori sunt asociate cu cele mai mici ordine armonice (cel mult 43) și pot fi grupate în clustere de două sau patru noduri N7. Testele pe semnale monoarmonice au demonstrat că fiecare astfel de cluster este afectat doar de două, respectiv patru ordine armonice impare. A fost conceput un algoritm inovativ, dedicat evaluării parametrilor care caracterizează fiecare semnal monoarmonic ce formează prin superpoziție un semnal armonic compus (denumit în cele ce urmează **SHI**) generat de un cluster de două sau 4 ordine armonice.

### 3.3. Semnale de testare și verificarea acurateții reconstrucției

Semnalele de test artificiale (S) utilizate au fost generate prin suprapunerea unei sinusoide perfecte cu amplitudinea de 800 și frecvența de 50 Hz cu semnale armonice care generează un spectru armonic bogat, similar curenților puternic poluați din sistemele energetice. În S, ponderile armonicilor impare au fost setate aleatoriu la valori din intervalul  $[0...0,1]$  relativ la amplitudinea semnalului fundamental. Valori semnificativ mai mici (de cel mult 0,04) au fost setate aleatoriu la ponderile armonicilor pare de ordin mai mic decât 6, iar restul au fost setate la 0. Defazajele sunt aleatorii. Fig. 2.1 prezintă un exemplu pentru S.

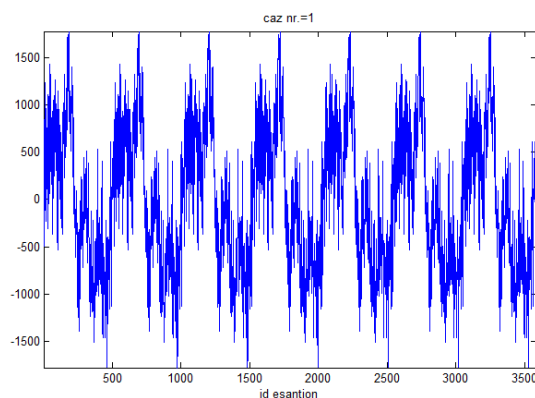


Fig. 3.3. Exemplu de semnal de test

Armonicile grupate în cvadruple sunt caracterizate prin ordinele lor ( $H_1, \dots, H_4$ ), ponderile ( $A_1, \dots, A_4$ ) și defazajele relative la componenta fundamentală ( $f_1, \dots, f_4$ ). Caracteristicile clusterelor studiate sunt reprezentate în tabelul 2.I.

Tabel 3.8. Caracteristicile clusterelor studiate

Cluster 1		Cluster 2		Cluster 3	
Ordine armonice	Id noduri N7	Ordine armonice	Id noduri N7	Ordine armonice	Id noduri N7
11, 13, 19, 21	8,6,14,16	23,25,39,41	11,15,27,31	27,29,35,37	10,12,26,28

Metoda se bazează pe descompunerea lui S folosind WPT, urmată de o recompunere folosind doar subarborii asociați clusterelor studiate, utilizând indicatori care caracterizează fiecare nod. Pentru un anumit cvadruplu  $S_i$  ( $i=1,2,3$ ), prin procedura de descompunere/recompunere se obține un semnal (RHC $_i$ ) care aproximează într-o anumită măsură semnalul armonic generat prin suprapunerea semnalelor armonice asociate lui  $S_i$  (adică RHS $_i$ ). În etapa preliminară, a fost evaluată acuratețea rezultatelor obținute prin descompunere/recompunere, calculând diferențele dintre semnalele „RHS” și „RHC” pentru toate cvadruplele studiate.

Fig. 3.4 prezintă exemple de forme de undă obținute ca rezultate ale acestor teste, luând în considerare a treia perioadă din S.

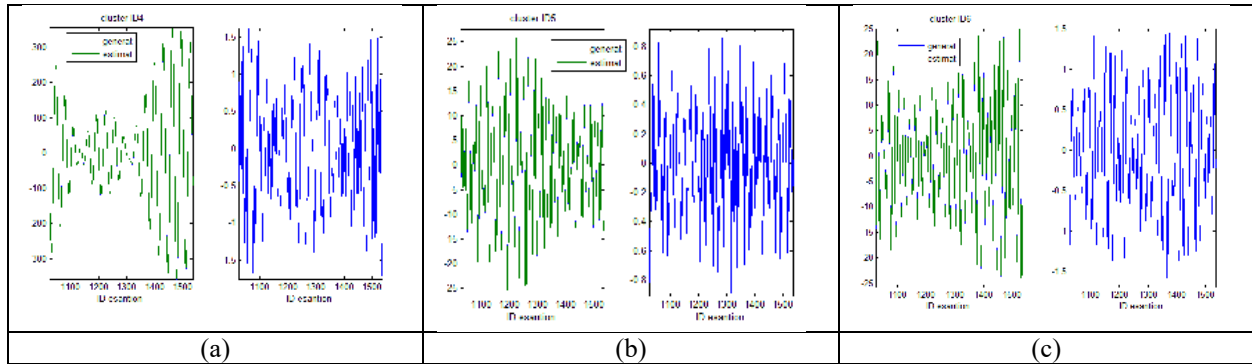


Fig. 3.4. Stânga - RHS $_i$  suprapus cu RHC $_i$  ; Dreapta – RHS $_i$ -RHC $_i$ . (a) – primul cluster; (b) al doilea cluster; (c) al treilea cluster.

Considerand diferența  $D_i = \text{RHS}_i - \text{RHC}_i$ , au fost calculate următoarele metrici:

- raportul modulelor valorilor maxime ( $D_i$  vs RHS $_i$ ), care a fost în gama [3.04 ...9.68]%;
- eroarea medie pătratică (RHS $_i$  vs RHC $_i$ ) relativă la modulul valorii maxime a RHS $_i$ , care a fost în gama [1.2 ...4.91]%;
- erori asociate energiilor semnalelor (diferența între energiile RHS $_i$  și RHC $_i$  versus energia RHS $_i$ ), care a fost în gama [-0.07 ...8.43]%;

Valorile mici ale metricilor calculate validează algoritmul optimizat bazat pe subarbori în raport cu acuratețea descompunerii/recompunerii .

### 3.4.Deducerea parametrilor armonici folosind descompuneri și recompuneri de tip WPT optimizate și sisteme liniare

În cele ce urmează, notația *armi* reprezintă ordinul armonic al celei de-a  $i$ -a armonice impare asociate unui anumit cluster C ( $i=1...4$ ). Numărul de puncte de calcul pentru o perioadă este 512 și, prin urmare, pasul de discretizare notat cu „pas” este egal cu  $2\pi/511$ .

Un număr de 512 ecuații, precum Ec. (4), pot fi scrise pentru fiecare perioadă din RHSi, aplicând teorema superpoziției armonice în punctele perioadei (identificate prin poziția lor întregă în segmentul de calcul ca „i\_c”):

Pentru a estima parametrii fiecărui ordin armonic pentru un anumit cluster, trebuie calculate patru perechi (Ai,fi). Prin urmare, au fost concepute sisteme de opt ecuații cu opt variabile, care se bazează pe seturi de opt puncte de calcul i\_k alese aleatoriu.

Considerând o matrice D cu 8 rânduri și 8 coloane și doi vectori coloană cu opt componente, astfel de sisteme pot fi reprezentate formal ca: [D] [X]=[B].

Matricea D se assemblează astfel: elementul „k” dintr-o coloană impară de ordin „2\*j-1” se calculează cu formula:  $\cos(\text{ordin\_armonic\_j} * i\_k * \text{pas})$ , iar elementul „k” dintr-o coloană pară de ordin „2\*j” se calculează cu formula:  $\sin(\text{ordin\_armonic\_j} * i_k * \text{pas})$ . j ia valorile 1...4, k=1...8 și i\_k sunt indicii punctelor de calcul (numere întregi), alese aleatoriu pentru asamblarea sistemului.

Elementele din B sunt calculate cu formula  $RHC(i_k)/A_1$ , k=1...8, iar A1 este amplitudinea componentei fundamentale.

Soluțiile sistemului conduc la determinarea parametrilor armonicilor după cum urmează:

$$f_k = \sin^{-1}(X(2k - 1)/\sqrt{X(2k - 1)^2 + X(2k)^2});$$

$$A_k = \sqrt{X(2k - 1)^2 + X(2k)^2},$$

unde k=1..4.

Trebuie utilizate mai multe seturi de puncte de calcul aleatorii i1,...i8, generând mai multe mulțimi de soluții posibile. Un prim criteriu pentru detectarea și eliminarea soluțiilor incorecte constă în prezența unor părți imaginare nenule ale valorilor defazajelor.

Următorul pas constă în sortarea ponderilor și eliminarea valorilor care sunt mult prea diferite de valoarea medie sau mai mari decât 1. Fig. 3.5 prezintă rezultatele generate prin rezolvarea a 100 de sisteme, înainte de eliminarea valorilor deviate pentru ponderi.

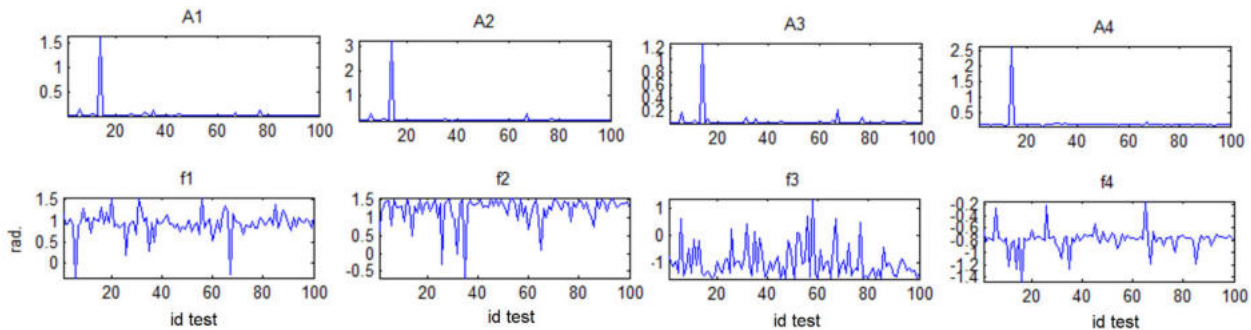


Fig. 3.5. Soluții obținute prin rezolvarea a 100 de sisteme, înainte de eliminarea valorilor deviate pentru ponderi.

Valorile medii sunt ulterior calculate atât pentru defazaje, cât și pentru ponderi. Datorită caracteristicii de nedeterminare a rezultatelor generate de funcția arcsin() (pentru că  $\sin(\pi-x)=\sin(-\pi-x)$ ), sunt necesare calcule suplimentare pentru a selecta o anumită combinație de defazaje din 16 soluții posibile, a.î. să se minimizeze diferența dintre semnalul RHC și semnalul RHS\_S. RHS\_S este semnalul obținut după suprapunerea componentelor armonice calculate pe baza valorilor rezultate prin rezolvarea sistemelor.

### 3.5. Testarea algoritmului

Algoritmul a fost testat pe seturi de câte 3 semnale artificiale pentru fiecare cvadruplu. Fig. 3.6 prezintă exemple de forme de undă generate și calculate pentru RHS, RHC și RHS\_S.

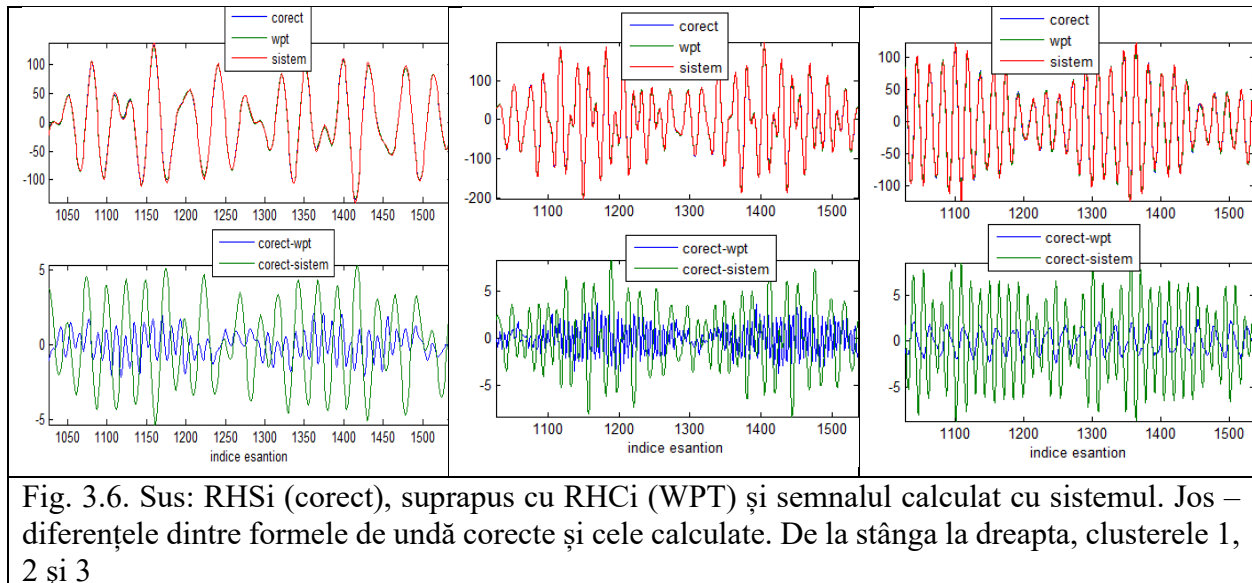


Fig. 3.6. Sus: RHS<sub>i</sub> (corect), suprapus cu RHC<sub>i</sub> (WPT) și semnalul calculat cu sistemul. Jos – diferențele dintre formele de undă corecte și cele calculate. De la stânga la dreapta, clusterelor 1, 2 și 3

În concluzie, acuratețea determinării ponderilor și defazajelor a fost evaluată pentru fiecare test ca raport procentual între modulul diferenței (corect-calculat cu sistem) și corect. Pentru ponderi erorile de estimare au fost în gama [0,15 – 6,15] %, iar pentru defazaje s-au calculat erori în gama [0,04-5,8]%. Acestea sunt acceptabile și validează algoritmul.

Lucrare publicată:

1. Maria-Cristina Nițu, Livia-Andreea Dina, Ileana-Diana Nicolae, Marian-Ștefan Nicolae, Paul-Mihai Mircea, **Overvoltages Transmitted in the Transformer Windings on the Lightning Impulse—An Analytical Method for Determination and Experimental Measurements**, Appl. Sci. 2025, 15, 5861. <https://doi.org/10.3390/app15115861>