



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

<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 IV-a – Decembrie 2025

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

Raport de cercetare privind o soluție de monitorizare și analiză a parametrilor energiei electrice

4.1. Introducere

În cadrul raportului se propune integrarea rezultatelor de cercetare în servicii de proiectare și realizare a unor sisteme dedicate aplicațiilor industriale, realizate pe baza conceptului internetului industrial al lucrurilor. S-a efectuat activitatea **A4.1. Dezvoltarea unor soluții pentru monitorizarea și analiza parametrilor energiei electrice, integrând tehnologii avansate de prelucrare a mărimilor electrice cu transformate tip Wavelet.**

Soluția completă de monitorizare și analiză a mărimilor electrice este bazată pe componente care pot comunica între ele și pot stoca date pe un server web aflat la distanță. În urma analizei post-fenomen a datelor, se oferă o modalitate de evaluare a calității energiei electrice și a cantității de zgomot electromagnetic care poate afecta funcționarea corectă a dispozitivelor electrice. Astfel, soluția propusă poate fi considerată parte a unui sistem capabil să interacționeze în internetul industrial al lucrurilor (IIoT).

4.2. Achiziția mărimilor electrice cu un sistem mobil

Pentru a colecta mărimi electrice în sistem trifazat (curenți, tensiuni) s-a utilizat un sistem complex, care poate interacționa în internetul industrial al lucrurilor (IIoT). Sistemul de achiziție a datelor din fig. 4.1 este mobil și echipat cu o sursă de alimentare autonomă, ceea ce permite deplasarea și utilizarea sa la diferite obiective sau instalații electrice. Algoritmii de prelucrare a mărimilor electrice achiziționate permit analiza parametrilor prelevați de la diverse echipamente, precum: ieșirea unui generator electric dintr-o hidrocentrală, ieșirea unui transformator trifazat [1] dintr-o termocentrală sau ieșirea unui inverter trifazat dintr-o centrală fotovoltaică. Sensorii de măsurare a curentului utilizați permit achiziția unor valori efective ale curentului electric de până la 1.000 amperi.

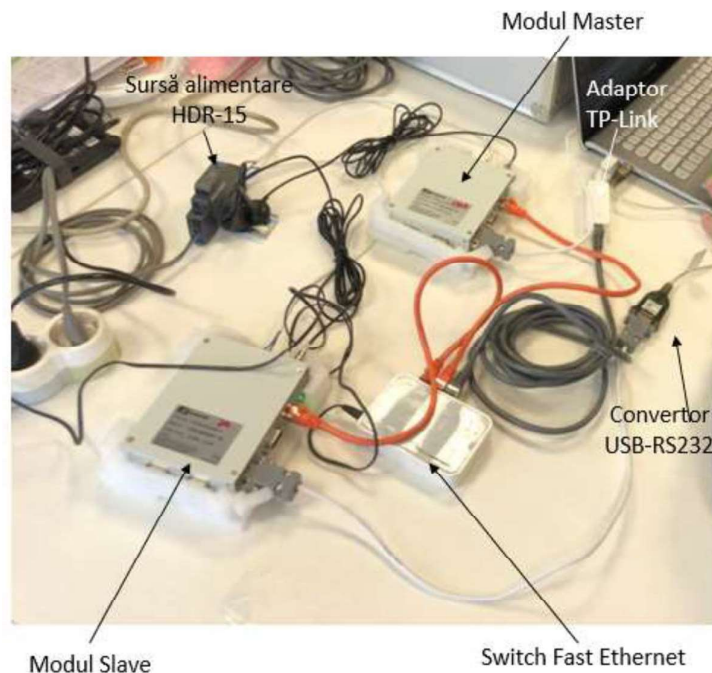


Fig. 4.1. Imagine de ansamblu a componentelor suplimentare ale sistemului de achiziție mobil utilizat pentru achiziția mărimilor electrice

4.3. Soluție IoT LoRa pentru monitorizarea parametrilor de mediu și energetici

Sistemele inteligente moderne integrează rețele IoT cu senzori ce colectează continuu date despre mediu și despre consumul energetic. Având în vedere alimentarea cu baterii a senzorilor, este esențial ca aceste rețele wireless să fie extrem de eficiente energetic. Studiile arată că nodurile senzoriale IoT nu vor fi conectate la rețea și funcționează pe baterii, deci înlocuirea frecventă a acestora nu este practică; prin urmare, este necesar un consum minim de energie[2]. În plus, aceste noduri pot funcționa luni sau chiar ani cu aceleași baterii, ceea ce impune optimizarea consumului pentru a asigura o autonomie îndelungată și monitorizare continuă fără reîncărcare frecventă. În acest context, tehnologia **LoRa** (Long Range) devine potrivită: aceasta suportă comunicații pe distanțe mari (până la ~15 km în spații deschise) cu consum foarte redus de energie, fiind proiectată pentru aplicații interactive în internetul lucrurilor (IoT) distribuite.

Sistemul propus în fig. 4.2 este o platformă experimentală utilizată pentru a prelua date de la un sistem senzorial care permite monitorizarea unor parametri ai mediului, cât și transmiterea unor comenzi în funcție de anumite semnale de alertă, prin intermediul protocolului LoRa spre un Gateway, care apoi permite stocarea datelor local sau în cloud, de îndată ce o conexiune wireless este disponibilă.

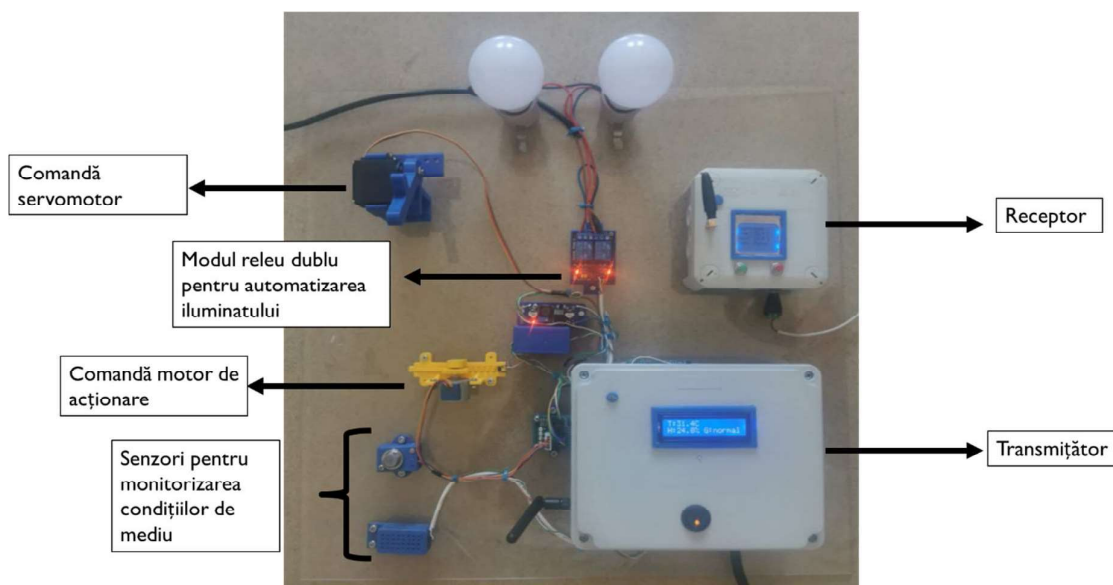


Fig. 4.2. Platformă experimentală bazată pe protocolul LoRa, capabilă să interacționeze în IIoT. S-a realizat un sistem pentru comanda: iluminatului, a unui motor de acționare, respectiv a unui servomotor

Tehnologia **LoRa/LoRaWAN** este proiectată pentru rețele cu rază lungă de acțiune și consum minim, fiind eficientă în anumite aplicații industriale. LoRa utilizează benzi sub-GHz (ex. 868 MHz EU), traversând ușor pereții și acoperind o zonă foarte întinsă. În rețeaua LoRaWAN dispozitivele finale (senzori) transmit direct către una sau mai multe stații de bază (gateway-uri), ce retransmit datele către serverul central. Această topologie de tip „stea-în-stea” (star-of-stars) simplifică instalarea (fără noduri intermediare mesh).

Sistemul dezvoltat material utilizează o arhitectură modulară și extensibilă. Partea de **transmițător** se bazează pe o placă Arduino Mega 2560 (MC ATmega2560) – un microcontroler cu mulți pini digitali și PWM, necesari în proiectele complexe de automatizare. Arduino Mega preia datele de la diverși senzori (temperatură, umiditate, gaze, lumină) și

controlează relee sau motoare prin semnale digitale/PWM. Un modul LoRa (ex. Ebyte E49-400T20D, 433 MHz, 20 dBm) conectat la Arduino realizează transmisia datelor la mare distanță. Pentru conectivitate la internet, se folosește o placă NodeMCU cu ESP8266: aceasta se conectează Wi-Fi la o platformă cloud (Arduino IoT Cloud), permițând acces la date din orice locație. În rețea, fiecare nod senzor LoRa poate comunica cu mai multe gateway-uri LoRa, care încarcă datele în serverele cloud, în topologia *star-of-stars* specifică LoRaWAN[3]. Această arhitectură asigură flexibilitate: pot fi adăugați ușor noi senzori sau noduri în sistem, iar funcționarea este *independentă* de rețelele tradiționale (când se colectează date din locații îndepărtate).

4.4. Implementarea practică

Sistemul propus poate monitoriza *parametri de mediu* esențiali (temperatură, umiditate, intensitate luminoasă, nivel gaze periculoase) și parametri energetici (tensiune, curent, putere). De exemplu, se pot utiliza: un senzor de temperatură și umiditate, un senzor detector gaze inflamabile [4]. Gazul detectat poate declanșa automat deschiderea unei ferestre (ventilație) sau alarmarea utilizatorului; *LDR* (fotorezistor) – senzor de lumină, folosit de sistemul de iluminare automat: la un nivel redus de lumină naturală, Arduino activează un releu pentru aprinderea luminii; *Relee și drivere* – pentru comanda circuitelor de iluminat sau a motoarelor pas cu pas pentru sistem de încuietore inteligent, și un servomotor pentru deschidere fereastră. Parametrii monitorizați sunt transmiși în timp real prin rețeaua LoRa către unitatea centrală și către aplicația mobilă sau cloud. Interacțiunea în internetul industrial al lucrurilor se realizează prin urmărirea permanentă a mediului și controlul de la distanță al echipamentelor.

Sistemul de transmisie a datelor a fost implementat experimental, având două module principale: *transmițătorul* și *receptorul*. Transmițătorul (Arduino Mega) citește periodic valorile senzorilor, le procesează local și transmite datele relevante prin modulul LoRa. De asemenea, poate reacționa la comenzi primite (de exemplu, deschidere ușă/fereastră). Receptorul folosește o placă Arduino Uno conectată la un modul LoRa și un afișaj Nokia 5110. Comunicarea între transmițător și receptor se realizează exclusiv prin *LoRa*, asigurând funcționarea fiabilă chiar și în medii cu acoperire radio precară. În plus, modulul LoRa poate comuta dispozitivul în modul de așteptare (*deep sleep*) când nu transmite, ceea ce prelungeste foarte mult autonomia bateriilor.

4.5. Programul de analiză și diagnoză

Programul, elaborat în MATLAB, conține mai multe module, reprezentate în fig. 4.3.

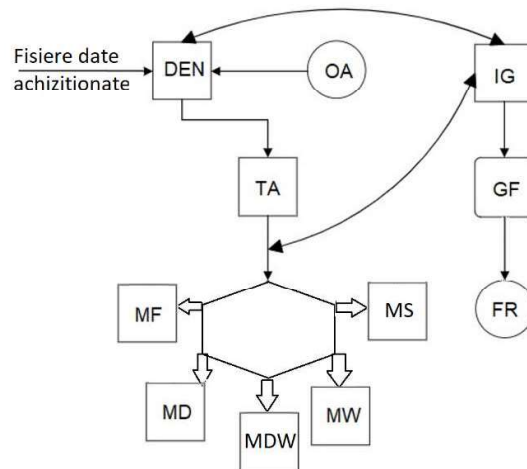


Fig. 4.3. Schema bloc a programului de analiză și diagnoză

Componentele programului dezvoltat sunt:

- un modul de eliminare a zgomotului electromagnetic (DEN), prin care se estimează și elimină zgomotul electromagnetic asociat datelor din fișierele transferate spre server. Estimarea se poate efectua prin metode diferite, în funcție de opțiunile introduse de operator (OA);

- un modul pentru stabilirea tipului de analiză (TA) care se poate folosi în cazul datelor din fișierul analizat curent; modulul folosește rezultate preliminare generate de transformata wavelet discretă (DWT);

- un modul de analiză și diagnoză în domeniul frecvență (MF) care se bazează pe transformata Fourier rapidă; acest modul generează valorile numerice pentru indicii de calitate a puterii în sistem monofazat/trifazat, diagramele spectrale pentru curenți, tensiuni și puteri, precum și diagramele fazoriale;

- un modul de analiză și diagnoză în domeniile timp-frecvență (MD) care se bazează pe DWT; modulul generează valorile numerice pentru indicii de calitate a puterii în sistem monofazat/trifazat, diagramele de variație în timp ale vectorilor de detalii și diagramele folosite la calculul puterilor reactive în sistem trifazat, specifice metodei;

- un modul de analiză și diagnoză (MDW) în domeniile timp-frecvență care se bazează pe DWT, respectiv pe transformata tip Wavelet Packet Transform (WPT) pentru a determina valorile numerice aferente momentelor de timp ale apariției unei abateri de la staționaritate, respectiv ordinilor armonice care s-au modificat odată cu apariția ei, generând totodată și reprezentările grafice ale energiilor nodurilor WPT modificate;

- un modul (MW), bazat pe WPT, pentru estimarea parametrilor caracteristici ai armonicilor de ordin scăzut - pentru cele staționare folosindu-se sisteme liniare, iar pentru cele nestaționare folosindu-se FFT pe semnale simetrizate;

- un modul (MS) pentru evaluarea componentelor instantanee aferente frecvenței fundamentale de 50 Hz, cu implementarea corecțiilor aferente evaluării componentelor armonicii de ordin 2;

- un modul (GF) care permite generarea de fișiere cu rezultatele generate de diferitele tipuri de analize, care se salvează pe suport extern;

- o interfață grafică (IF), care permite selecția fișierelor care urmează a fi supuse analizei, reprezentarea grafică a datelor din fișiere, pornirea unui anumit tip de analiză cu afișarea principalelor rezultate pe interfața grafică și optarea pentru analize care generează fișiere cu rezultate.

Programul utilizează trei tipuri de date de intrare: (a) parametrii statici, în această categorie intrând factorii de scară și valorile offset-urilor pentru fiecare canal, precum și fișierele de date care caracterizează modul de lucru al descompunerilor de tip WPT, SWT și DWT; (b) parametrii configurabili, adică valoarea de prag pentru raportul SNR, parametrii utilizați de algoritmul original de separare a frecvențelor de tip „filtru trece-jos” implementat pe baza transformatei WPT, ponderea minimă a armonicilor afișate de analiza FFT, precum și tipul de denoizificare (cu sau fără WPT);

(c) fișiere cu date achiziționate, în format .DAT, selectabile din interfața grafică.

Diagrama bloc din fig. 4.4 prezintă principalele acțiuni realizate pentru a determina componentele caracteristice ale semnalelor achiziționate, folosite pentru analiza de tip FFT, DWT, WPT, DWT conjugat cu WPT și respectiv SWT.

Astfel, se estimează într-un mod original (folosind combinații liniare între energiile primilor trei vectori de detalii generați de descompunerea DWT) energia zgomotului datorat interferențelor electromagnetice care poluează formele de undă analizate. Apoi, folosind aceste estimări ale energiei, se estimează variația în timp a zgomotului care a poluat fiecare dintre semnalele achiziționate.

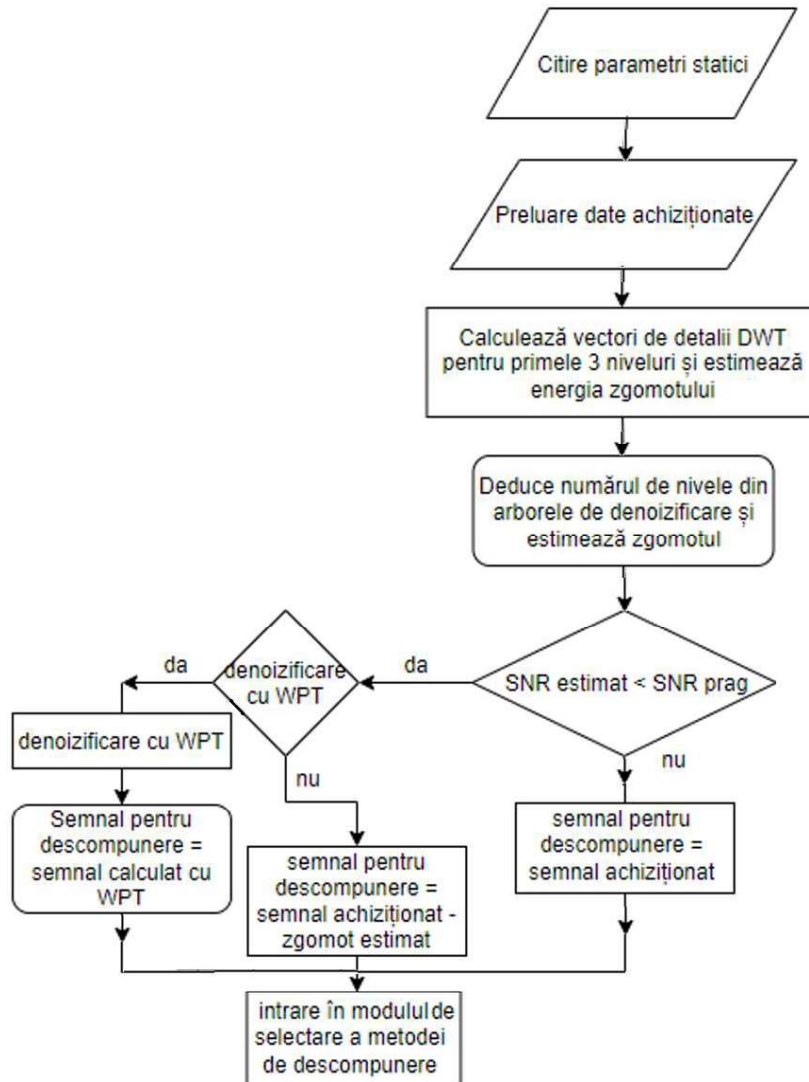


Fig. 4.4. Secvența de acțiuni necesare pentru determinarea componentelor caracteristice ale semnalelor achiziționate.

În continuare, doar dacă valoarea calculată pentru SNR este mai mică decât valoarea prag furnizată ca dată de intrare, se înlătură din semnalele achiziționate componentele ale căror frecvențe depășesc frecvența de tăiere (dacă se folosește o metodă originală bazată pe WPT), respectiv frecvența aferentă armonicilor 41 (dacă se folosesc funcțiile de denoizificare specializate din Matlab – `wden()`).

După parcurgerea acestor pași se obțin semnalele care urmează a fi analizate, prin descompunere cu diferite transformate în funcție de caracteristicile lor sau de opțiunile stabilite din interfața grafică.

Diagrama din fig. 4.5 descrie pașii parcurși în continuare. Astfel, dacă vectorul de detalii aferent primului nivel al arborelui de descompunere DWT nu prezintă deviații semnificative (salturi de amplitudine mare), se optează pentru analiza ce folosește descompunerea bazată pe FFT.

Dacă însă sunt detectate astfel de deviații, condițiile de aplicare a transformatei FFT nu sunt îndeplinite. Valorile corecte pentru indicii de calitate a puterii se calculează în acest ultim caz folosind vectorii de detalii pentru toate nivelurile arborelui de descompunere DWT, precum și vectorul de aproximări aferent celui de-al 7-lea nivel.

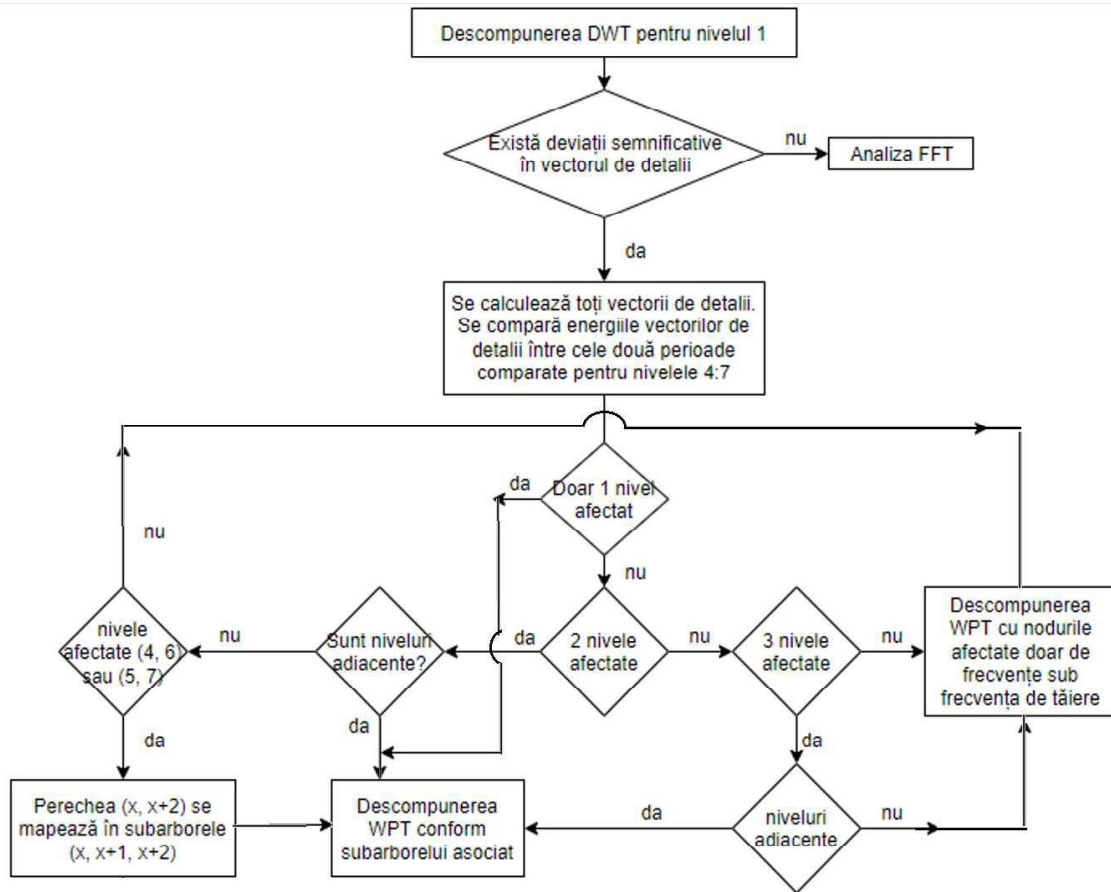


Fig. 4.5. Determinarea automată a metodei de analiză cu descompunerea WPT optimizată bazată pe subarbori.

Momentul de timp la care a apărut devierea de la staționaritate este acela în care a apărut deviația în vectorul de descompunere 1 (VD1). Analizele de tip Wavelet oferă însă informații și în domeniul frecvență, nu doar în domeniul timp. De aceea, pentru identificarea gamelor de frecvențe cărora li se datorează abaterea de la staționaritate localizată în domeniul timp prin intermediul VD1, este necesară compararea unei perioade de regim staționar cu perioada unde s-a detectat abaterea de la staționaritate. În acest scop, se compară energiile vectorilor VD_x (cu $x=4\dots7$) și, în funcție de numărul de nivele afectate și respectiv de indicii lor, se realizează într-un mod original descompuneri WPT optimizate din punctul de vedere al timpului de execuție și al consumului de memorie. Optimizarea se bazează pe asocierile existente între vectorii VD_x ale căror energii diferă între cele două perioade și respectiv vectorii găzduiți de nodurile din nivelul 7 al arborilor WPT.

Descompunerea WPT optimizată furnizează vectorii găzduiți de nodurile selectate din nivelul 7 al arborelui WPT. Acum se pot calcula și compara (între cele două perioade) energiile acestor vectori. Pașii parcurși în continuare sunt reprezentați în fig. 4.6.

Astfel, mai întâi se calculează diferențele între energiile nodurilor și se evaluează maximum dintre valorile absolute ale acestor diferențe (ΔE_{nodmax}).

Se construiește un set (Safectat) ce conține informații despre nodurile a căror energie a fost modificată cu o valoare de minim $0,3 \times \Delta E_{nodmax}$. Safectat se sortează apoi descrescător după valorile absolute ale variațiilor de energie și se calculează mapările dintre indicii fiecărui nod selectat și armonicile primară (totdeauna) și secundară (doar când există) care îi afectează energia. Astfel se detectează și afișează armonicile care au o contribuție semnificativă la abaterea de la staționaritate (le notăm AN), în ordinea impusă de modulul acestei contribuții.

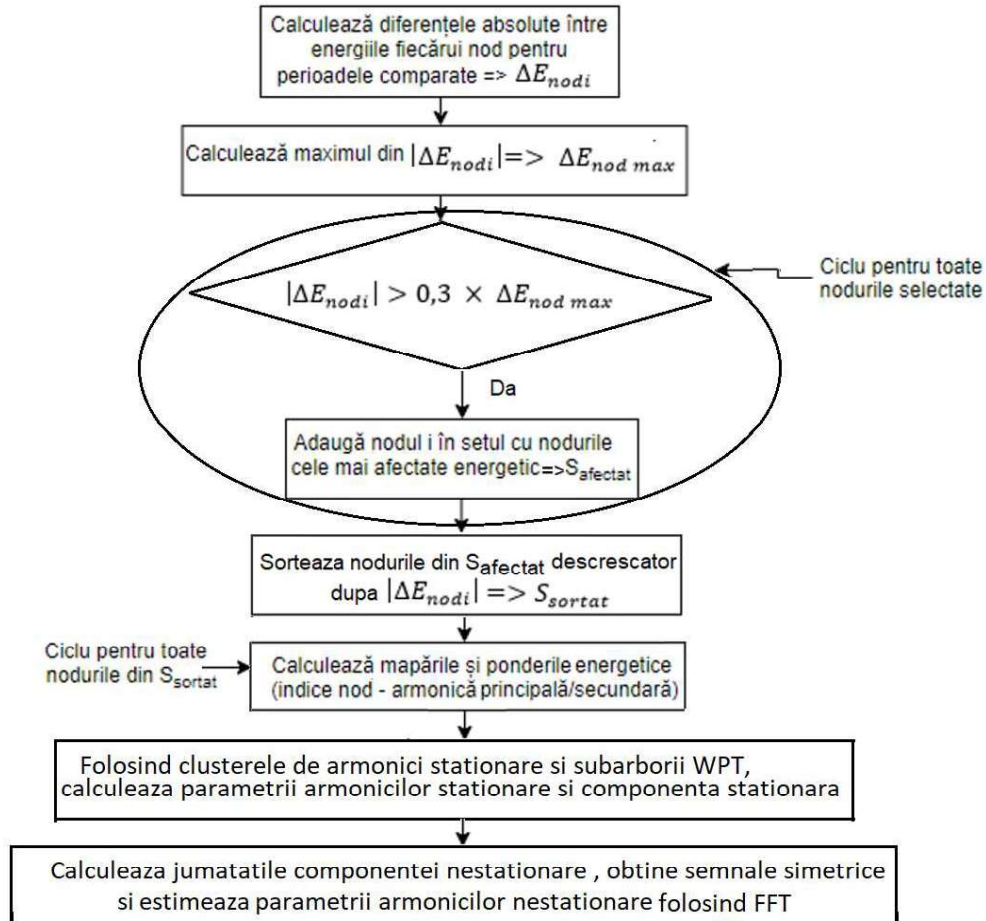


Fig. 4.6. Calculul parametrilor armonicilor staționare și nestacionare folosind WPT.

Semnalele (SAS) rezultate prin analiza WPT folosind subarborii și teorema superpoziției aplicată la clusterelor de armonici care nu au o contribuție semnificativă la nestationaritate (armonici notate cu AS) se folosesc la determinarea parametrilor caracteristici ai armonicilor AS. Din semnalul descompus se scad apoi semnalele SAS, obținându-se componenta nestacionară. Aceasta este descompusă în două jumătăți (J1 și J2). Folosind simetrizarea, pe baza J1 și J2 se obțin două semnale cu semiperioade simetrice (SJ1 și SJ2), care sunt supuse individual analizei FFT. Se face medierea rezultatelor obținute cu FFT asupra SJ1 și SJ2 și se obține o estimare a parametrilor armonicilor nestacionare.

Rezultatele sunt afișate atât sub formă grafică, cât și ca valori numerice. Atât descompunerea bazată pe FFT, cât și cea bazată pe oricare dintre tipurile de analiză Wavelet calculează indicii de calitate a puterii pentru mărimile de fază, respectiv sistemul trifazat.

Analiza FFT generează următoarele rezultate numerice:

(A) Pentru fiecare fază: (a) Spectrele pentru armonicile cu pondere peste valoarea prag aleasă de utilizator (linii formate din: ordinul armonic, valoarea efectivă, defazaajul față de fundamentală -în grade hexazecimale, și ponderea amplitudinii față de fundamentală -în procente); (b) Valorile efective (totale și respectiv pe fundamentală); (c) Valorile reziduurilor deformante; (d) Distorsiunile armonice totale; (e) Factorii de putere; (f) Valorile maxime și factorii de vârf; (g) Valorile puterilor active, reactive și aparente (per total și respectiv pentru fundamentală), precum și puterile deformante totale.

(B) Pentru sistemul trifazat, valorile puterilor active, reactive și aparente (per total și

respectiv pentru fundamentală), puterea deformantă totală, factorul de putere total și factorul de putere de deplasare.

Pe de altă parte, descompunerea folosind analiza wavelet generează următoarele rezultate numerice specifice, folosind suportul teoretic fundamentat de Morsi:

(A) Pentru fiecare fază: (a) puterile aparente fără aproximări și puterile neactive, atât pentru tensiuni, cât și pentru curenți; (b) puterile deformante ale curentului și respectiv tensiunii; (c) factorii de putere de deplasare (dPF) și respectiv oscilanți.

(B) Pentru sistemul trifazat, atât pentru curenți, cât și pentru tensiuni: (a) valorile eficace totale, de tip „nod zero” (I_z și U_z) și respectiv de „nod non-zero” (I_{nz} și U_{nz}); distorsiunile armonice totale echivalente (THDI și THDU), raporturile de distorsiune echivalente (DI și DU) și puterile de distorsiune (DeI și DeU); (b) puterea activă a aproximărilor (P_{app_plus}) și detaliilor (P_{det}); (c) puterile aparente de mai multe tipuri: cea efectivă calculată cu formulă specifică DWT (SE), cea efectivă asociată aproximărilor (Se_{app}), cea efectivă de tip „non-aproximări” (Se_N), cea efectivă asociată detaliilor (Se_{det}); (d) puteri: non-activă (N), reactivă a aproximărilor (Q_{app_plus}), de dezechilibru, cea asociată aproximărilor (S_{uapp}) și respectiv cea asociată detaliilor (S_{udet}); (e) factorul de putere al aproximărilor pentru secvența directă (PF_{app_plus}); (f) poluarea datorată detaliilor (DP trifazat) și dezechilibrul de sarcină (LU).

Fig. 4.7 prezintă o perioadă achiziționată dintr-un punct de măsură la un grup de putere al Termocentralei Rovinari, înainte de eliminarea zgomotului alb care afectează formele de undă ale curenților. Formele de undă sunt puternic distorsionate datorită redresorului cu tiristoare folosit pentru excitație.

Analiza DWT a generat pentru curentul i_1 , înaintea denoizificării, vectorii de detalii reprezentați în fig. 4.8.

După denoizificare, vectorii de detalii DWT pentru nivelurile 1...4 calculați pentru același curent au variația reprezentată de fig. 4.9.

Vectorii de detalii pentru nivelurile 5...7 nu mai sunt reprezentați deoarece sunt identici în ambele cazuri (componentele de frecvențe înalte asociate zgomotului și eliminate în urma denoizificării nu afectează ultimele nivele). Se observă cum prezența zgomotului „maschează” salturile bruște din vectorii de detalii de pe nivelul 1 și astfel se demonstrează că denoizificarea este recomandată pentru regimuri de acest tip.

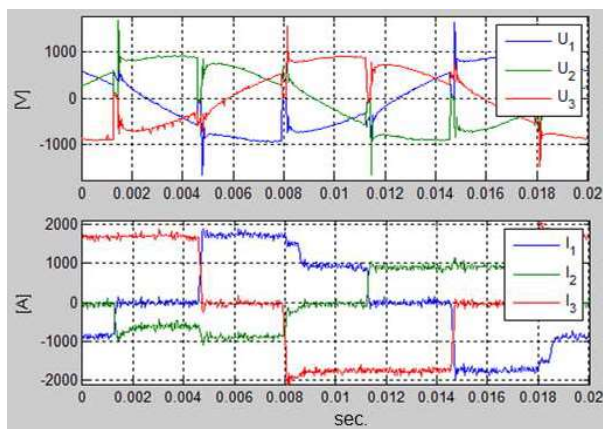


Fig. 4.7. O perioadă achiziționată dintr-un punct de măsură la un grup de putere al Termocentralei Rovinari, înainte de eliminarea zgomotului alb

Diagramele din fig. 4.10, generate în vederea realizării analizelor wavelet, reprezintă modul în care formele de undă asociate curenților sunt defazate și suprapuse pentru a calcula puterile active și reactive în sistem trifazat. Sunt evidențiate odată în plus nesimetriile și abaterile de la formele de undă ideale sinusoidale de către curenții din sistemul trifazat analizat.

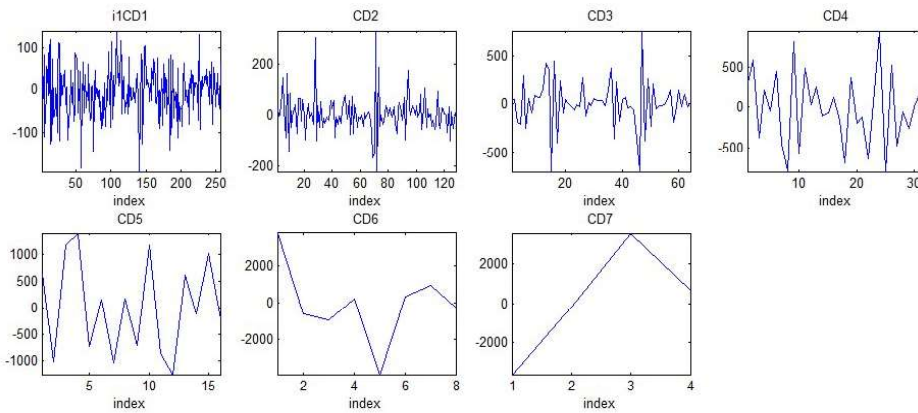


Fig. 4.8. Vectorii de detalii calculați cu DWT pentru curentul i_1 , înainte de denoizificării.

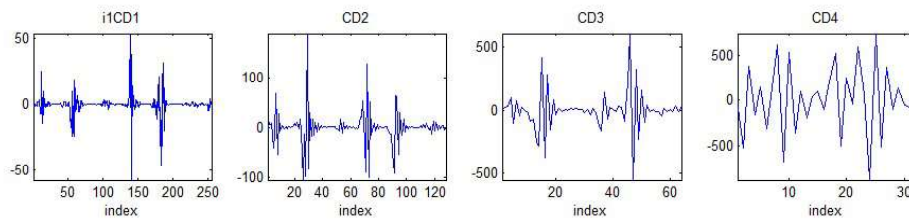


Fig. 4.9. Vectorii de detalii calculați cu DWT pentru i_1 , nivelurile 1...4, după denoizificare.

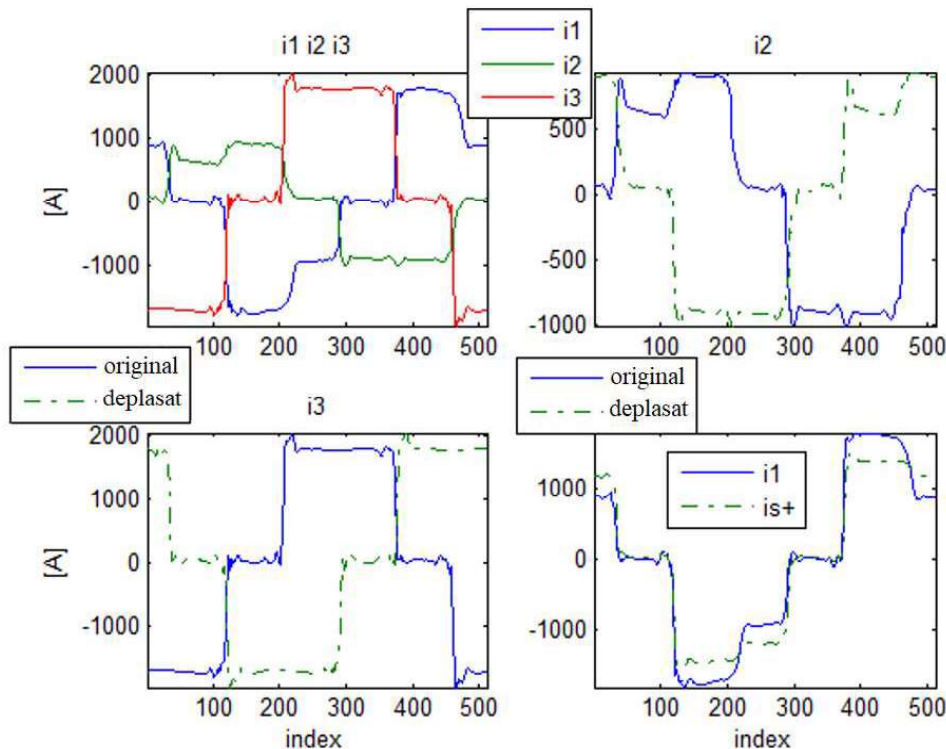


Fig. 4.10. Formele de undă asociate curenților, defazate și suprapuse pentru a calcula puterile active și reactive în sistem trifazat folosind analiza wavelet.

Descompunerea conjugată (DWT și WPT) generează informații despre armonicile care s-au modificat cel mai mult între două perioade comparate (P1 și P2). Astfel, pentru fiecare nod

care face parte din mulțimea ordonată în sens descrescător al modulelor variațiilor energiilor nodurilor între P1 și P2, se precizează: indexul nodului, numărul armonicii principale (cea care afectează cel mai mult nodul) și respectiv al celei secundare (dacă există), modulul diferenței apărute în energia nodului și valoarea procentuală a acestei diferențe, relativ la energia primei perioade.

Pentru exemplificare se consideră un alt segment dintr-un curent preluat de la același punct de test în timpul unui regim tranzitoriu, urmărind modul original de identificare a ordinelor armonice responsabile pentru modificarea spectrului de frecvențe între două perioade. Fig. 4.11 prezintă cele două perioade comparate, suprapuse. Se observă că perioada a 2-a nu mai coincide cu prima începând din momentul de timp asociat eșantionului cu numărul 200.

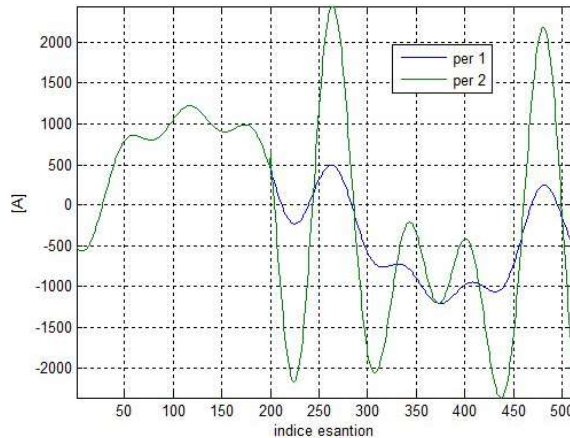


Fig. 4.11. Două perioade suprapuse, folosite ca exemplu de funcționare al analizei WPT.

Programul selectează automat nodurile cele mai afectate energetic și le reprezintă, așa cum reiese din fig. 4.12. Descompunerea bazată pe WPT oferă reprezentări grafice sub formă de bare ale perechilor de energii calculate pentru nodurile selectate (corespunzătoare perioadelor comparate) în funcție de indecșii nodurilor.

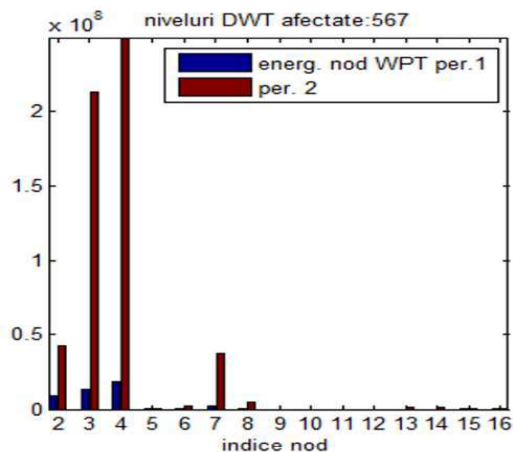


Fig. 4.12. Diagramă generată de WPT pentru exemplul din fig. 4.11.

Rezultatele numerice generate de WPT (fig. 4.13) pentru exemplul din fig. 4.11 evidențiază faptul că au fost afectate doar armonicile 3,5,7 și 9 prin intermediul liniilor care descriu ordinele armonice dominante și respectiv minore care pot influența nodurile cele mai afectate.

nodurile cele mai afectate considerand modulele erorilor
 nod nr.4 dif. energ. abs.=-230067692.9144, diferenta [%]=-1231.5899
 ord. arm.dominanta=5 / pondere in nod=**0.98293**

nod nr.3 dif. energ. abs.=-199563550.0489, diferenta [%]=-1514.6389
 ord. arm.dominanta=7 / pondere in nod=0.84869/ ord. arm.minora=9 / pondere in nod=**0.15067**

nod nr.7 dif. energ. abs.=-34627567.5574, diferenta [%]=-1485.6669
 ord. arm.dominanta=9 / pondere in nod=0.84862 / ord. arm.minora=7 / pondere in nod=**0.15068**.

nod nr.2 dif. energ. abs.=-32718476.2424, diferenta [%]=-348.9429
 ord. arm.dominanta=3 / pondere in nod=**0.98131**

Fig. 4.13. Rezultate generate de WPT pentru exemplul din fig. 4.11

Reprezentările grafice generate de descompunerea bazată pe FFT sunt următoarele: (a) Spectrele pentru armonicile de curent și tensiune, a căror pondere depășește valoarea prag aleasă de utilizator; (b) Spectrele armonice asociate atât puterilor de fază, active și reactive, cât și puterilor totale active și reactive; (c) Diagramele fazoriale pentru tensiuni și curenți.

Reprezentările grafice generate de descompunerile bazate pe DWT și SWT sunt următoarele: (a) Curbele de variație în timp ale vectorilor de detalii pentru toate nivelele arborilor de descompunere atât pentru curenți, cât și pentru tensiuni; (b) Diagramele folosite pentru calculul puterilor trifazate.

Reprezentările grafice generate de descompunerile bazate pe WPT afișează diagrame precum cea din fig. 4.14, reprezentând energiile din nodurile de pe ultimul nivel de descompunere.

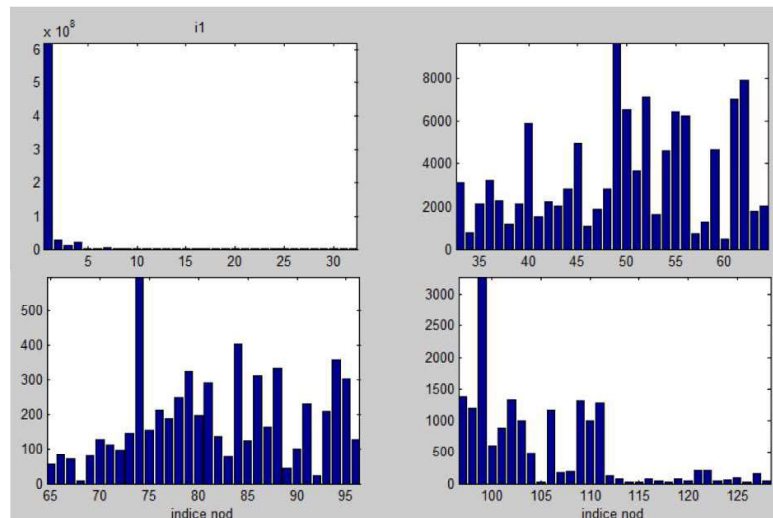


Fig. 4.14. Exemplu de diagramă cu energiile afișate de analiza WPT pentru nodurile de pe nivelul 7.

Atât rezultatele numerice cât și cele grafice pot fi salvate în fișiere, programul creând nume de directoare sugestive pe baza datei și orei la care s-au achiziționat datele analizate.

Programul este dezvoltat pe baza unor module care pot fi apelate și independent prin intermediul interfeței grafice.

Figura 4.15 prezintă o interfață dezvoltată pentru analiza datelor care provin de la opt sisteme de achiziții de date și permite selectarea individuală a tuturor modulelor apelabile individual.

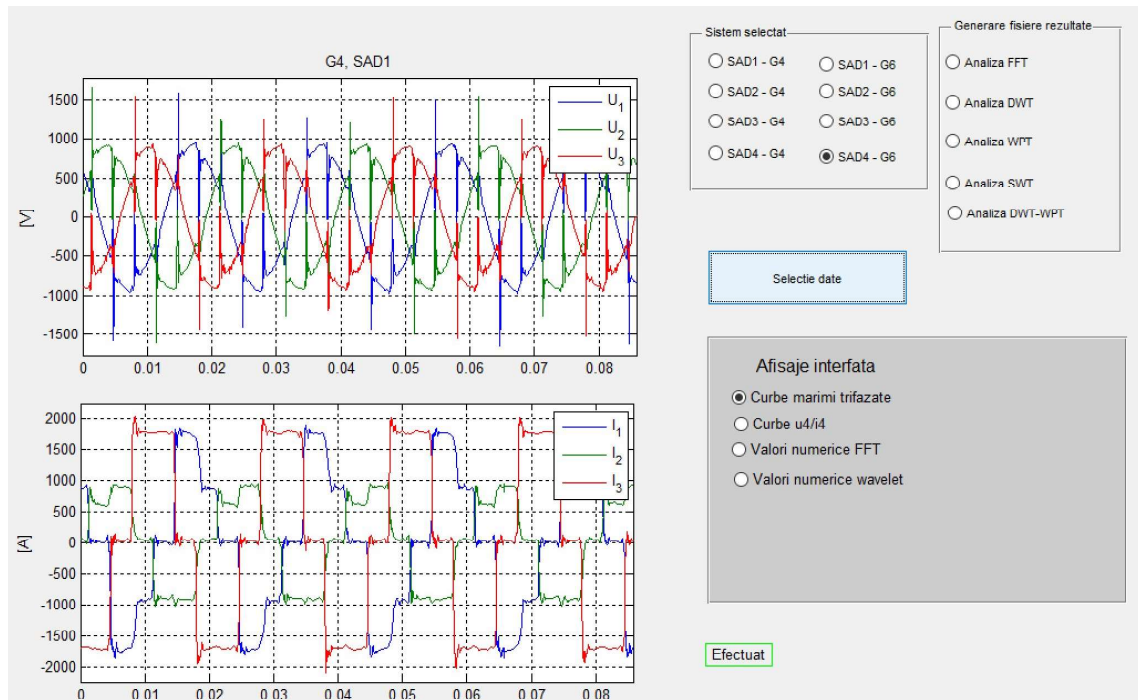


Fig. 4.15. Exemplu de utilizare a interfeței care permite analiza curbelor achiziționate din opt puncte de test.

Astfel, grupul de controale „Sistem selectat” permite specificarea SAD-ului care a preluat datele ce urmează a fi analizate, aceste date fiind salvate într-un fișier salvat în directorul asociat SAD-ului respectiv. Fișierul se selectează apoi apăsând butonul identificat prin numele „Selectie date”.

Pentru curbele reprezentate în fig. 4.15, fig. 4.16 se prezintă ecranul afișat cu valorile calculate folosind FFT, iar fig. 4.17 prezintă valorile calculate folosind transformata DWT.

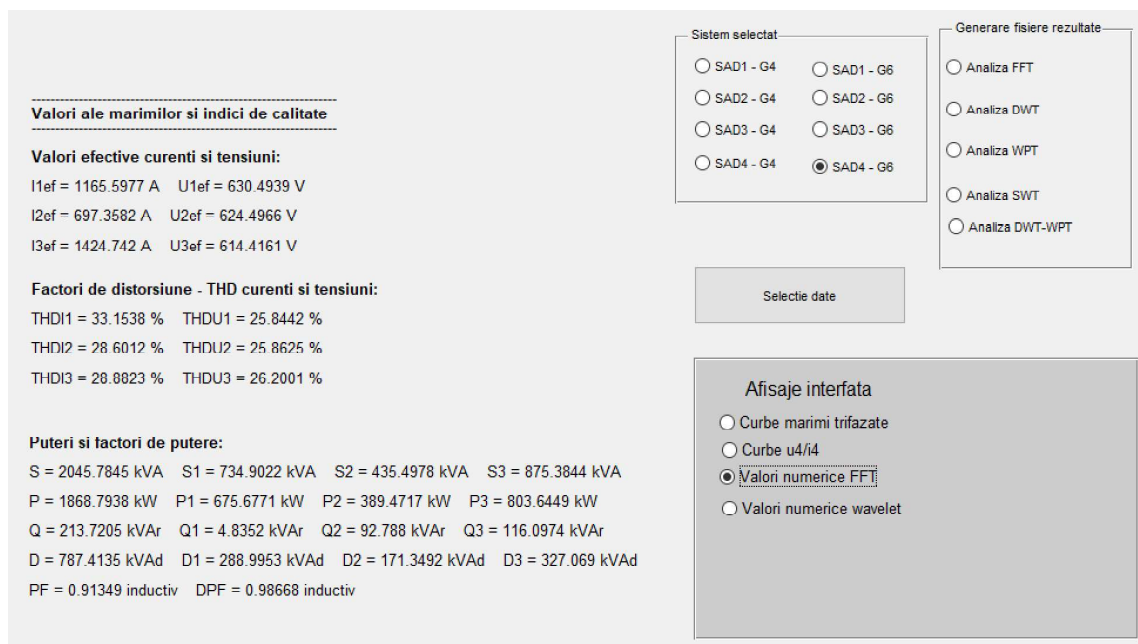


Fig. 4.16. Ecran cu valorile numerice calculate cu FFT pentru formele de undă din fig. 4.15

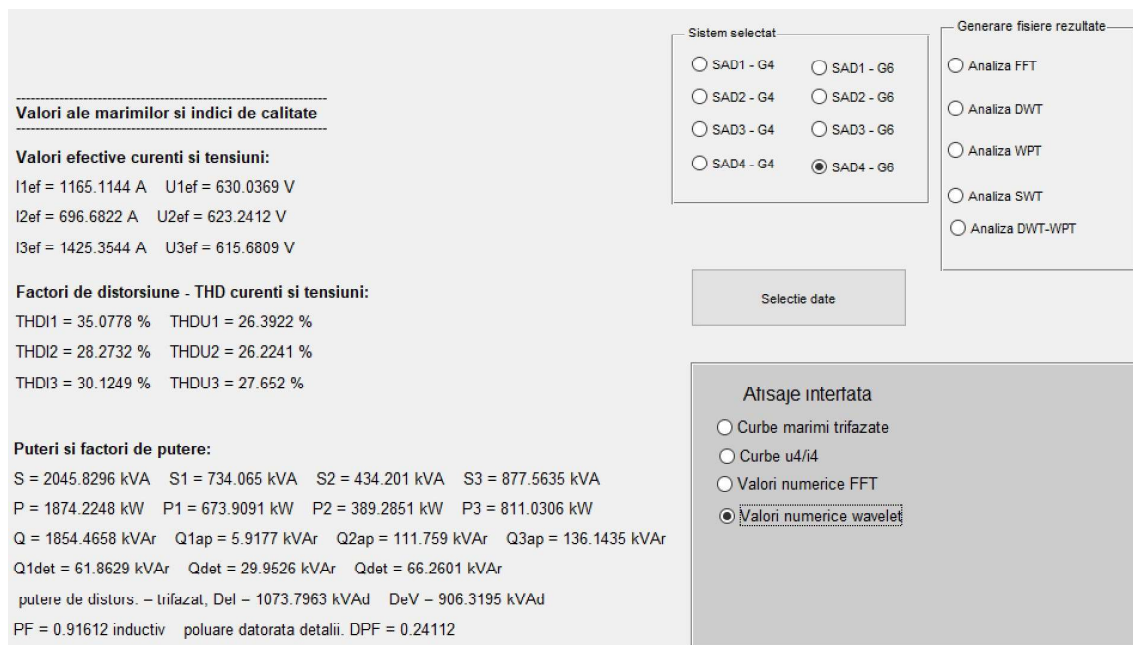


Fig. 4.17. Ecran cu valorile numerice calculate cu transformata wavelet pentru formele de undă din fig. 4.15.

Fig. 4.18 prezintă spectrele puterilor active și reactive pentru curbele din fig. 4.15, generate de FFT. Ponderea de 300% din fundamentală (imposibilă) pentru puterea reactivă a primei faze demonstrează că pentru acest exemplu rezultatele furnizate de FFT pentru puterile reactive sunt eronate, lucru evidențiat și de valorile din figurile 4.16 și 4.17.

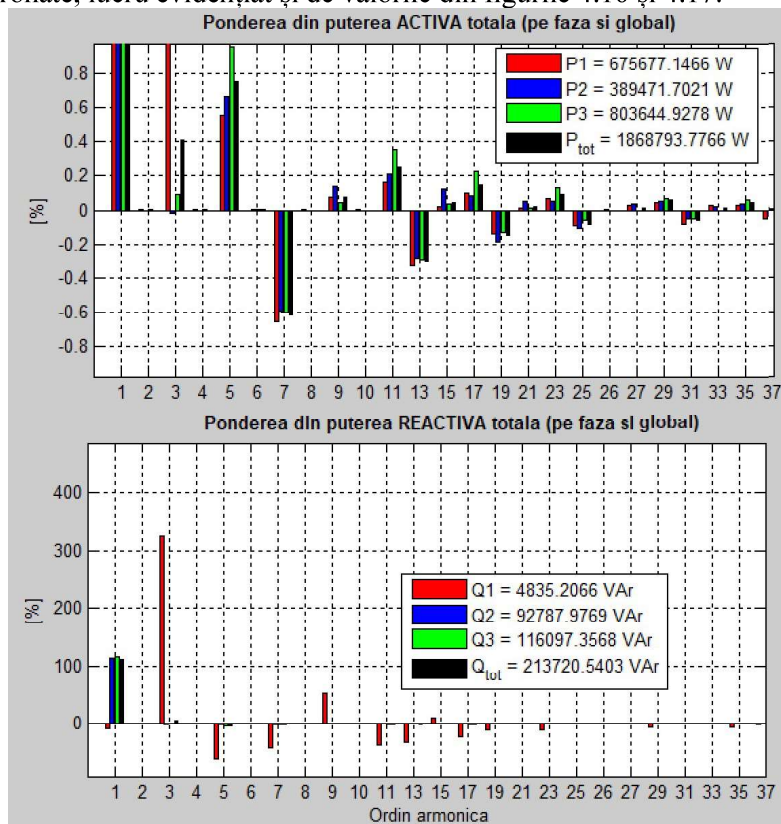


Fig. 4.18. Spectrele puterilor active și reactive pentru curbele din fig. 4.14, generate de FFT.

4.7. Concluzii

A fost dezvoltat un sistem robust pentru monitorizarea parametrilor energetici și de mediu, integrabil în IIoT. Pentru achiziția datelor s-a utilizat un ansamblu hardware–software care include un sistem mobil de achiziții de date electrice (până la 1000 A), o platformă IoT bazată pe LoRa/LoRaWAN pentru transmisii pe distanțe mari cu consum redus de energie, stocare locală și în cloud, control la distanță și funcționare autonomă. Acest sistem permite utilizarea în multiple medii industriale (hidrocentrale, termocentrale, centrale fotovoltaice) și oferă monitorizare continuă cu autonomie mare a senzorilor.

Analiza și diagnoza mărimilor electrice se bazează pe un program MATLAB complex, care integrează algoritmi originali bazați pe FFT, DWT și WPT. Programul dezvoltat elimină zgomotul electromagnetic prin tehnici originale, identifică automat regimurile staționare și nestaționare, detectează armonicile responsabile de abaterile de la staționaritate, calculează complet indicii de calitate a energiei electrice în regim monofazat și trifazat, oferă reprezentări grafice și valori numerice detaliate pentru toate componentele puterilor și distorsiunilor. Astfel, sistemul permite o diagnoză profundă și precisă a calității energiei electrice.

Transformatele Wavelet și Wavelet Packet aduc contribuții originale pentru detectarea abaterilor și optimizarea analizei. Cercetarea propune o modalitate originală de estimare a zgomotului electromagnetic, identificarea momentului exact al apariției abaterilor de la staționaritate, o procedură optimizată de selecție a nodurilor WPT pentru reducerea timpului de calcul, algoritmi pentru determinarea armonicilor staționare și nestaționare prin simetrizare și analiză ulterioară cu FFT. Aceste rezultate permit o analiză avansată și eficientă a semnalelor electrice distorsionate, utile în sisteme industriale complexe.

Sistemul bazat pe tehnologia **LoRa** demonstrează eficiență și stabilitate în monitorizarea parametrilor ambientali și de siguranță într-un mediu industrial dens. Datorită razei mari de acțiune și consumului energetic redus, comunicațiile rămân fiabile chiar când rețelele Wi-Fi sau GSM sunt indisponibile. Combinând parametrii de mediu (temperatură, umiditate, lumină, gaze) cu măsurarea parametrilor electrice (tensiune, curent, consum), o astfel de arhitectură poate deveni o platformă completă de **monitorizare și analiză a energiei** în medii industriale. În final, prototipul dovedit îmbunătățește considerabil securitatea și confortul prin monitorizare continuă și control de la distanță, grație tehnologiei LoRa și interfețelor IoT moderne.

Combinăția hardware LoRa + Arduino + NodeMCU realizează astfel o soluție de monitorizare distribuită robustă: se transmit date în cloud și pe aplicație mobilă, iar utilizatorul poate controla de la distanță rețelele și motoarele conectate.

Lucrări publicate

Articole indexate ISI cu factor de impact

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>, factor de impact 2.5
2. Nițu, M.-C.; Nicolae, I.-D.; Dina, L.-A.; Mircea, P.-M. Power Transformer Inrush Current Analysis: Simulation, Measurement and Effects. *Appl. Sci.* 2024, 14, 10926. <https://doi.org/10.3390/app142310926>, factor de impact 2.5

Lucrări indexate IEEE xPlore

3. I. -D. Nicolae, P. – M. Nicolae and M. -Ș. Nicolae, "An Active Filter Compensation Solution for High Power Energy Sources," *2025 IEEE Energy Conversion Congress & Exposition Asia (ECCE-Asia)*, Bengaluru, India, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/ECCE-

Asia63110.2025.11111934.

4. I. -D. Nicolae, A. Hurezeanu, P. –. M. Nicolae and M. –. Ş. Nicolae, "The Design and Implementation Combining Space Vector PWM and Advanced FOC Algorithms to Improve Dynamic Control of Asynchronous Motors," *2025 IEEE Energy Conversion Congress & Exposition Asia (ECCE-Asia)*, Bengaluru, India, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/ECCE-Asia63110.2025.11111942.

5. Marian-Stefan Nicolae, Petre-Marian Nicolae, Ileana-Diana Nicolae, "Improving the Accuracy of Wavelet Algorithms when Evaluating the Fundamental Components of Highly Distorted Electric Waveforms", 15th International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN) 2025, Chişinău, Republica Moldova, în curs de publicare.

6. Marian-Stefan Nicolae, Petre-Marian Nicolae, Petrisor, Abagiu, Ileana-Diana Nicolae, Raluca-Cristina Nicolae, Iurie Nuca, "Smart Home Monitoring Based on the LoRa Protocol as a Solution for Connectivity in Difficult Environments", 15th International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN) 2025, Chişinău, Republica Moldova, în curs de publicare.